Producción Eco-Eficiente del Arroz en América Latina

Tomo I



Editado por:

Víctor Degiovanni B.
César P. Martínez R.
Francisco Motta O.

CIAT
Centro Internacional de Agricultura Tropical
International Center for Tropical Agriculture
Consultative Group on International Agricultural Research

Fondo Latinoamericano para Arroz de Riego
FLAR

Universidad de Córdoba

CIAT
El Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT) es una organización sin ánimo de lucro, que trabaja para reducir el hambre y la pobreza y mejorar la salud humana en los trópicos mediante una investigación que aumente la eco-eficiencia de la agricultura. El CIAT es uno de los 15 centros que son financiados por los 64 países, fundaciones privadas y organizaciones internacionales que constituyen el Grupo Consultivo para la Investigación Agrícola Internacional (CGIAR).

El CIAT recibe también fondos para servicios de investigación y desarrollo que se prestan, bajo contrato, a un número creciente de clientes institucionales. La información y las conclusiones contenidas en esta publicación no reflejan necesariamente los puntos de vista de los donantes.
www.ciat.cgiar.org

FLAR
El Fondo Latinoamericano para Arroz de Riego (FLAR) es una alianza público-privada de asociaciones de productores de arroz, compañías molineras y de semillas e instituciones nacionales de investigación, que representa un foro regional permanente en el cual sus socios encuentran soluciones para sus necesidades de tecnología y de desarrollo de su respectivo sector arrocero. Iniciado en 1995 por entidades gremiales de Brasil, Colombia y Venezuela y por el Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), conforma hoy un grupo heterogéneo de 28 instituciones de los sectores público y privado pertenecientes a 15 países (Argentina, Bolivia, Brasil, Colombia, Costa Rica, Ecuador, Guatemala, Guyana, Honduras, México, Nicaragua, Panamá, República Dominicana, Uruguay y Venezuela) además del CIAT. El FLAR es una institución líder, integradora y participativa del sector arrocero de América Latina y el Caribe, cuya misión es servir a sus socios y, por su medio, fortalecer a los productores de arroz latinoamericanos promoviendo la estabilidad de sus instituciones y su integración a la cadena productiva.

Basado en principios de competitividad y sostenibilidad, el FLAR ofrece respuestas tecnológicas innovadoras a las necesidades de los cultivadores y de la agroindustria del arroz, y lidera procesos de generación y transferencia de tecnología que, preservando los recursos naturales y el medio ambiente, reducen los costos unitarios de producción del arroz de riego, incrementan la rentabilidad de los productores y benefician a los consumidores. Su objetivo general es mejorar el arroz de riego en la región por medios genéticos y mediante la eficiencia técnica y económica de toda la cadena productiva que genera ese cultivo. El FLAR se financia con aportes anuales de las instituciones que lo integran, los cuales se relacionan con la producción de arroz en cáscara de cada país. El FLAR está dirigido por un Comité Administrativo constituido por representantes de todas las entidades asociadas.
www.flar.org

UNICORDOBA
La Universidad de Córdoba (en Montería, Dpto. de Córdoba, Colombia) es una institución pública de educación superior cuya misión es formar integralmente personas capaces de interactuar en un mundo globalizado, tanto en el campo de las ciencias básicas como en el de las ciencias sociales, las ciencias humanas, la educación, la salud, y las ciencias asociadas con la producción agroindustrial y las ingenierías. Para lograrlo, genera conocimientos en ciencia, tecnología, arte y cultura, y contribuye al desarrollo humano y a la sostenibilidad ambiental de la región y del país.

Unicórdoba es reconocida como una de las mejores instituciones públicas de educación superior de Colombia por la calidad de sus procesos académicos y porque su gestión institucional se orienta al mejoramiento de la calidad de vida de los habitantes de la región. Con tal fin, ejecuta proyectos de investigación y de extensión en cooperación con el sector productivo regional y aplica sus resultados.
www.unicordoba.edu.co

ISBN 978-958-694-102-0

Producción Eco-Eficiente del Arroz en América Latina

Tomo I

Capítulos 1-24

Editado por:

Víctor Degiovanni B.
César P. Martínez R.
Francisco Motta O.

CIAT
Centro Internacional de Agricultura Tropical
International Center for Tropical Agriculture
Consultative Group on International Agricultural Research

Fondo Latinoamericano para Arroz de Riego
FLAR

Centro Internacional de Agricultura Tropical
International Center for Tropical Agriculture
Apartado Aéreo 6713
Cali, Colombia
Tel.: 57 2 4450000
Fax: 57 2 4450073
Correos electrónicos: c.p.martinez@cgiar.org
vdegiovanni@sinu.unicordoba.edu.co
Internet: www.ciat.cgiar.org

Publicación CIAT No. 365
ISBN 978-958-694-102-0
Tiraje: 500 ejemplares
Impreso en Colombia
Septiembre de 2010

Producción eco-eficiente del arroz en América Latina / editado por Víctor Degiovanni B., César P. Martínez R. y Francisco Motta O. -- Cali, CO : Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), 2010.
487 p. -- (Publicación CIAT no. 365)
Tomo I, capítulos 1-24.
ISBN 978-958-694-102-0

Descriptores AGROVOC en español:
1. *Oryza sativa*. 2. Arroz. 3. Taxonomía. 4. Morfología vegetal. 5. Crecimiento. 6. Adaptación. 7. Fisiología vegetal. 8. Fitomejoramiento. 9. Variedades. 10. Transformación genética. 11. Arroz de secano. 12. Arroz irrigado. 13. Métodos de cultivo. 14. Aplicación de abonos. 15. Control de malezas. 16. Valor nutritivo. 17. Producción. 18. Economía. 19. Colombia. 20. América Latina.

Descriptores locales en español:
1. Especies silvestres. 2. Resistencia a herbicidas. 3. Rizipiscicultura. 4. Competitividad.

Descriptores AGROVOC en inglés:
1. *Oryza sativa*. 2. Rice. 3. Taxonomy. 4. Plant morphology. 5. Growth. 6. Adaptation. 7. Plant physiology. 8. Plant breeding. 9. Varieties. 10. Genetic transformation. 11. Upland rice. 12. Irrigated rice. 13. Cultural methods. 14. Fertilization. 15. Weed control. 16. Nutritive value. 17. Production. 18. Economy. 19. Colombia. 20. Latin America.

Descriptores locales en inglés:
1. Wild species. 2. Herbicide resistance. 3. Rizipisciculture. 4. Competitiveness.

I. Degiovanni B., V. II. Martínez R., C.P. III. Motta O., F. IV. Centro Internacional de Agricultura Tropical. V. Ser.

Categoría de materia AGRIS: F01 Cultivo / Crops

Clasificación LC: SB 191 .R5 P763

Víctor Degiovanni, Ing. Agrónomo, M.Sc. especialista en Fisiología de Cultivos y en cultivo de arroz, es profesor e investigador del Departamento de Agronomía de la Universidad de Córdoba, Montería, Colombia.

César P. Martínez, Ph.D., Fitomejorador, especialista en cultivo de arroz, es Líder del Programa de Arroz del CIAT.

Francisco Motta, Ing. Agrónomo, M.Sc. en Fisiología de Plantas, es especialista en edición técnica en ciencias agrícolas.

Derechos de Autor © CIAT 2010. Todos los derechos reservados.

El CIAT propicia la amplia diseminación de sus publicaciones impresas y electrónicas para que el público obtenga de ellas el máximo beneficio. Por tanto, en la mayoría de los casos, los colegas que trabajan en investigación y desarrollo no deben sentirse limitados en el uso de los materiales del CIAT para fines no comerciales. Sin embargo, el Centro prohíbe la modificación de estos materiales y espera recibir los créditos merecidos por ellos. Aunque el CIAT elabora sus publicaciones con sumo cuidado, no garantiza que sean exactas ni que contengan toda la información.

Agradecimientos

Los editores agradecen al Dr. Bill Hardy, editor científico en Servicios de Comunicación y Publicaciones del Instituto Internacional de Investigaciones sobre el Arroz (IRRI), por la revisión externa de gran parte de este Tomo I. Reconocen también la amable colaboración de Mariano Mejía, documentalista de la Biblioteca en la Unidad de Comunicaciones Corporativas y Fortalecimiento de Capacidades (CCC) del CIAT, en la elaboración de los resúmenes técnicos de los capítulos del tomo. Agradecen también a Lynn Menéndez, traductora de la CCC, por la traducción al inglés de los resúmenes para elaborar los 'abstracts' de la obra. Expresan finalmente un agradecimiento sincero a todos los docentes, investigadores, cultivadores y operarios que contribuyeron a la realización de esta obra.

In memoriam

Profesionales del Programa de Arroz del CIAT fallecidos entre 1973 y 2009

Joaquín González, M.Sc.
Agrónomo, Coordinador del Programa de Arroz, CIAT (1984-1988)
(Bogotá, 4 febrero 1936 – Cali, 24 agosto 1998)

Manuel Rosero, Ph.D.
Fitomejorador del Programa de Arroz, CIAT (1976-1988)
(Ipiales, 14 febrero 1931 – Cali, julio 2007)

Edgar Tulande, I.A.
Asistente de Investigación del Programa de Arroz, CIAT (1979-2001)
(Villavicencio, 8 julio 1952 – Villavicencio, 28 marzo 2001)

Su misión
es descubrir su vocación
y luego entregarse a ella
con todo su corazón
Buda

Contenido

		Página
Prólogo		ix
Prefacio		xi
Sobre los Autores		xiv
	INTRODUCCIÓN	
Capítulo		
1	Nuevos retos y grandes oportunidades tecnológicas para los sistemas arroceros: Producción, seguridad alimentaria y disminución de la pobreza en América Latina y el Caribe *Luis Roberto Sanint*	3
2	Tendencias en la producción mundial de arroz *Rafael Posada*	14
3	Fondo Latinoamericano para Arroz de Riego (FLAR): Nueva asociación para el sector arrocero *Gonzalo Zorrilla de San Martín*	26
	PARTE A **Eco-Fisiología de la Planta de Arroz**	
4	Origen, taxonomía, anatomía y morfología de la planta de arroz (*Oryza sativa* L.) *Víctor Degiovanni, Luis Eduardo Berrío, Roger Enrique Charry*	35
5	Índices fisiotécnicos, fases de crecimiento y etapas de desarrollo de la planta de arroz *Alfredo de J. Jarma, Víctor Degiovanni, Rafael A. Montoya*	60
6	El arroz y su medio ambiente *José Patricio Vargas*	83
7	La fisiología de la planta y la productividad del cultivo *Guillermo Riveros, Nubia Stella Rodríguez*	100
8	Rizipiscicultura: Alternativa para la seguridad alimentaria *Víctor Degiovanni, Víctor Julio Atencio, Roger Enrique Charry*	117

PARTE B
Mejoramiento y Nueva Tecnología Genética

Capítulo		Página
9	El mejoramiento del arroz *Edgar A. Torres, César P. Martínez*	141
10	Tolerancia del arroz a la temperatura baja *Maribel Cruz*	180
11	Mejoramiento del arroz de secano para América Latina *Marc Châtel, Elcio P. Guimarães, Yolima Ospina, César P. Martínez, Jaime Borrero*	191
12	Mejoramiento de poblaciones de arroz de secano empleando selección recurrente y desarrollo de variedades *Marc Châtel, Elcio P. Guimarães, Yolima Ospina, Francisco Rodríguez, Víctor Hugo Lozano*	207
13	Las especies silvestres en el mejoramiento varietal del arroz *César P. Martínez, Jaime Borrero, Silvio J. Carabalí, Fernando Correa, Myriam Cristina Duque*	225
14	Arroz más nutritivo contra la desnutrición en América Latina *César P. Martínez, Jaime Borrero, Myriam Cristina Duque, Silvio J. Carabalí, James Silva, Joe Tohme*	241
15	Transformación genética del arroz *Eddie Tabares*	253

PARTE C
Fertilidad, Nutrición y Manejo Estratégico del Cultivo

16	Manejo del suelo en la Altillanura de los Llanos Orientales de Colombia *Jaime Gómez*	279
17	Nutrición mineral del arroz *Sara Mejía de Tafur, Juan Carlos Menjívar*	306
18	Diagnóstico de problemas de fertilidad de suelos: Visión actual *Carlos A. Flor*	336
19	Manejo estratégico y producción competitiva del arroz con riego en América Latina *Edward L. Pulver*	350

PARTE D
Conocimiento de las Arvenses del Cultivo y su Manejo

Capítulo		Página
20	Malezas de los arrozales de América Latina *Cilia L. Fuentes, Armando Osorio, Juan Carlos Granados, Wilson Piedrahíta*	365
21	Manejo de las malezas del arroz en América Latina: Problemas y soluciones *Cilia L. Fuentes*	391
22	Arroz rojo en Colombia: Comportamiento y riesgos *Jairo Clavijo, Fabio Montealegre*	413
23	Acción de los herbicidas en un arrozal: Modo y mecanismo *Jairo Clavijo*	431
24	Resistencia a herbicidas en malezas asociadas con arroz *Albert Fischer, Bernal E. Valverde*	447

página blanca

Prólogo

El Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT) y el Fondo Latinoamericano para Arroz de Riego (FLAR) presentan, con satisfacción y cierto orgullo, a la comunidad interesada en el sector arrocero (instituciones, productores, científicos, estudiantes), el Tomo I de la obra *Producción Eco-eficiente del Arroz en América Latina*. Este libro es el producto de la colaboración de científicos y arroceros pertenecientes a esas dos instituciones, a la Universidad de Córdoba, en Montería (Colombia), y a otras entidades latinoamericanas. El Tomo II está estructurado, sus primeros capítulos ya fueron editados y saldrá de la imprenta a mediados de 2011.

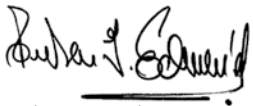
En el decenio de los 50, las plagas y enfermedades del arroz diezmaron el rendimiento de este cultivo en la región latinoamericana. Quienes se interesaban en el arroz respondieron entonces a esta crisis con un proyecto de estudio del cultivo que mitigaría el avance de esos factores bióticos adversos. La presente obra es una revisión y un perfeccionamiento de ese proyecto inicial, que culminó en el libro publicado por el CIAT en los años 80 bajo el título *Arroz: Investigación y producción*, y que fue consultado útilmente por científicos, productores y extensionistas del sector arrocero durante 30 años. El avance de las ciencias agrícolas en los últimos 50 años exigía una renovación de su contenido, que se basó en la sólida investigación hecha en ese medio siglo, incluyó la información actual sobre el cultivo y señaló rutas para el sector arrocero en el futuro. En esta tarea han colaborado, no sólo directivos, científicos y profesores sino también estudiantes y técnicos del CIAT, de varias Universidades —entre ellas, la Universidad de Córdoba, la Universidad Nacional de Colombia, y la Universidad de California, en EE.UU— y de instituciones como el Centro de Cooperación Internacional en Investigación Agrícola para el Desarrollo (CIRAD), de Montpellier, Francia, y el FLAR. El propósito de dichos investigadores ha sido transmitir sus conocimientos y experiencias para que los productores de arroz de hoy y del futuro enfoquen el cultivo con criterios cada vez más eco-eficientes. El CIAT y otras entidades regionales, para quienes el cultivo del arroz ocupa un lugar prioritario, cumplen además, con la publicación de esta obra, un compromiso contraído con el sector arrocero: mantenerlo al corriente de las innovaciones científicas y tecnológicas que beneficien el arroz y de las tendencias que puede adoptar este cultivo, fuente de un alimento básico para la población de América Latina y el Caribe.

El arroz es un grano de consumo. Se comercializa apenas el 5% de la producción mundial en el plano regional e internacional. Aunque algunos países asiáticos exportan la mitad de ese porcentaje, en otros, también de Asia, se realiza el 75% de las importaciones globales del grano. Recientemente, sin embargo, se han observado cambios significativos en ese comercio internacional. Aunque los países de América Latina y el Caribe son autosuficientes en un 97%, se ha calculado que tendrían un déficit de 2 a 4 millones de toneladas para el 2015. África es el continente que presenta el déficit de producción más grande. La demanda global de arroz aumenta por el crecimiento de la población y por los modelos de consumo de diferentes regiones. De otro lado, el análisis de las cifras recientes (2007-2008) indica que la producción de arroz será influenciada por variables de orden exógeno, principalmente, como el

incremento del valor del petróleo, las políticas nacionales de seguridad alimentaria y la agudización de las variaciones climáticas; ahora bien, estas variables han inducido ya una crisis de alimentos en el mundo. De allí la necesidad de continuar y profundizar las actividades públicas y privadas, nacionales, regionales e internacionales de investigación arrocera.

Los investigadores del arroz que contribuyen con artículos a esta obra han manifestado una actitud de liderazgo en su profesión. Su esfuerzo es constructivo porque presentan propuestas para el mejor desarrollo del cultivo del arroz en diferentes escenarios, desde el manejo agronómico hasta la labor educativa y el enfoque social. *Producción Eco-eficiente...* y las obras que en el futuro recopilarán los últimos adelantos de la investigación sobre el arroz son un reconocimiento a la labor de esas personas. Una fracción considerable de la humanidad les debe los resultados de su esfuerzo y del estímulo que han sabido imprimir a los que continuarán esta tarea.

Esperamos que el contenido de la obra *Producción Eco-eficiente...* despierte el interés de quienes producen e investigan este producto agrícola básico (una 'commodity' de importancia global), les sea útil y contribuya a mejorar el manejo agronómico del cultivo. Hay también en sus páginas elementos que servirán al sector arrocero en su propósito de desarrollar una seguridad alimentaria cada día más limpia y sostenible.



Ruben G. Echeverría
Director General, CIAT

Prefacio

El arroz es, hoy por hoy, un grano alimenticio básico para cerca de la mitad de la población del planeta; es, por ello, un componente esencial de la estabilidad política, económica y social de la humanidad y, en cierto sentido, de su supervivencia. Ahora bien, las condiciones socio-económicas que rodeaban antes la producción de arroz han cambiado, no sólo en el ámbito mundial sino en el regional y en el local. En 1966, hace cerca de medio siglo, se producían 257 millones de toneladas de arroz en el mundo; en el 2008 esa producción se elevó a 680 millones de toneladas.

En América Latina y en la región del Caribe (ALC), la producción de arroz se triplicó en los tres decenios comprendidos entre 1975 y 2005, gracias a la rápida adopción de variedades mejoradas por los cultivadores y a las prácticas agronómicas más adecuadas que acompañaban el cultivo de esas variedades. En el 2008 (últimos registros del Instituto Internacional de Investigaciones sobre el Arroz, IRRI) se producen en ALC más de 25 millones de toneladas de arroz 'paddy' (arroz en cáscara).

El arroz fue un cultivo de avanzada en la primera mitad del siglo XX. Se cultivaba principalmente en el sistema de secano, en especial el favorecido por las condiciones climáticas. En los años 70, cuando se inició la introducción de las nuevas variedades de porte bajo para el arroz con riego, el sistema de secano perdió su competitividad: no pudo superar el rendimiento creciente y la disminución de los costos de producción unitarios de las áreas irrigadas. Dos factores clave habían contribuido al éxito de las variedades cultivadas con riego: el desarrollo de mejores variedades mediante la aplicación de los métodos clásicos de mejoramiento y el uso de prácticas agronómicas que se ajustaban más a la índole del cultivo.

Sin embargo, la brecha del rendimiento, que es la diferencia entre la cantidad de arroz producida actualmente y la que podría obtenerse explotando todo el potencial de producción de las variedades mejoradas, es grande en la mayoría de los países productores y representa un reto para quienes quieren mejorar la competitividad del arroz en ALC. Los datos recientes del Fondo Latinoamericano para Arroz de Riego (FLAR) indican que, si se pone en práctica (se 'implementa') un paquete agronómico de siete elementos (siembra en la época oportuna, semilla de buena calidad, nivelación adecuada, buen manejo del agua, control oportuno de malezas, fertilización aplicada a tiempo, y asistencia técnica) en el cultivo de las mismas variedades que se siembran actualmente, se puede aumentar la producción del arroz de 1 a 2 t/ha logrando, al mismo tiempo, que su costo disminuya de 20% a 30%.

El consumo de arroz aumentó también en el siglo XX: pasó de menos de 10 kg per capita al año a cerca de 30. Aunque el nivel de autosuficiencia de la región se mantiene hoy en 90% y se ha incrementado la productividad del cultivo, la cantidad de arroz que se produce en ALC no alcanza para satisfacer la demanda; más aún, los efectos negativos del cambio climático pueden agravar este déficit. La seguridad alimentaria y nutricional es muy importante para esta región. Ahora bien, dado que se prevé para el 2015 un déficit grande de arroz, tanto a nivel mundial (50 millones de toneladas) como

en la región ALC (hasta 4 millones), es necesario desarrollar pronto nuevas variedades. Es éste un reto al que puede responderse combinando los métodos tradicionales de mejoramiento con las nuevas herramientas de la biología molecular y de la informática.

¿Hay suficiente variabilidad genética en el genoma del arroz para estimular la búsqueda de combinaciones genéticas y el desarrollo de nuevas variedades? La respuesta, por fortuna, es afirmativa. Por lo demás, el arroz es una especie vegetal modelo para análisis moleculares y para estudios de la función de los genes; por eso, muchos laboratorios, en diferentes partes del mundo, desarrollan actualmente nuevas metodologías aplicables al mejoramiento del arroz. La manipulación de ciertos genes del arroz permitiría alcanzar el objetivo de producir más arroz aplicando un enfoque eco-eficiente. Hay, sin embargo, una condición ineludible: formar y entrenar la nueva generación de investigadores para que puedan enfrentar los retos antes descritos.

La región de ALC posee abundantes reservas de agua y tierra y cuenta con un sector arrocero dinámico, innovador y organizado que responde rápidamente a las diversas situaciones que plantea el sostenimiento regional de un cultivo productivo; la región podría convertirse fácilmente en la despensa arrocera del mundo. De otro lado, los gobiernos de los países de ALC, por razones históricas complejas, han reducido su capacidad de investigación agrícola y de extensión rural, convirtiendo sus instituciones arroceras en socios importantes de quienes producen y promueven el arroz. Estas dos premisas motivaron a varios países de ALC a crear, en 1995, el FLAR y a persistir hasta hoy en su desarrollo. Este Fondo es un nuevo modelo institucional que incorpora entidades públicas de investigación, tanto nacionales como internacionales, y se asocia con empresas del sector privado. Convertido ya en institución de vanguardia en la investigación internacional, su consolidación representa, sin duda, un verdadero desafío para ALC.

Como un resultado de las actividades de investigación y desarrollo hasta aquí mencionadas, el CIAT y el FLAR presentan el Tomo I de la obra titulada *Producción Eco-eficiente del Arroz en América Latina*. La obra total (Tomos I y II, cerca de 40 capítulos) es, en realidad, una actualización y ampliación de otra equivalente publicada en 1985 bajo el título *Arroz: Investigación y producción*. En este primer tomo, una vez fijadas las coordenadas del arroz en los tres primeros capítulos, se analizan, en los cuatro siguientes, los aspectos relacionados con la morfología y la estructura de la planta de arroz, con los procesos fisiológicos de su desarrollo y con su capacidad de producción.

Como aplicación de esos principios, el Capítulo 8 presenta un caso específico y novedoso de cultivo de arroz combinado con otra actividad productiva. Enseguida, los principios y métodos empleados por el fitomejorador para desarrollar mejores variedades que respondan a los nuevos retos de la producción se estudian en los capítulos 9 a 14. Como respuesta a esos retos se consideran la capacidad de recuperación ('resiliencia' o reacción elástica) del cultivo al cambio climático, el uso agrícola más eficiente del agua y de los fertilizantes, la expresión plena del alto potencial de rendimiento de las variedades, el incremento en el valor nutricional e industrial del grano, y los cruzamientos con especies silvestres para ampliar la variabilidad genética del arroz comercial (*Oryza sativa* L.).

El Capítulo 15 se refiere a las nuevas herramientas moleculares y de bio-informática que son esenciales para ejecutar programas de selección asistida por marcadores, programas cuyo propósito es hacer más eficientes los procesos de selección de materiales y de desarrollo de nuevas variedades. Uno o dos capítulos sobre temas afines a éste y más actualizados aparecerán en el Tomo II. Resultados de primera línea sobre la fertilidad, la nutrición y el manejo estratégico del cultivo se tratan en los capítulos 16 a 19. En los cinco últimos (20 a 24) se presentan los avances logrados en el conocimiento de las malezas del arroz y en su manejo racional.

Este Tomo I, cuya distribución se inicia en septiembre de 2010, constituye además una primicia editorial en la XI Conferencia Internacional de Arroz para América Latina y el Caribe, evento que se realiza en Cali, Colombia, para conmemorar los 50 años de la fundación del IRRI y los 15 años del FLAR.

Sobre los Autores

Víctor Julio Atencio
Ing. Pesquero, Universidad del Magdalena
Especialista en Acuicultura, Universidad de los Llanos
M.Sc. en Acuicultura, UFSC, Brasil
Director, Centro de Investigación Piscícola
Profesor, Fisiología de la reproducción de peces
Departamento de Ciencias Acuícolas
Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia
Universidad de Córdoba*
vatencio@hotmail.com

Luis Eduardo Berrío
Ing. Agrónomo, Universidad de Caldas – Manizales
M.Sc. en Mejoramiento, Universidad Nacional de Colombia
Mejorador Investigador
Fondo Latinoamericano para Arroz de Riego (FLAR)
CIAT**
l.berrio@cgiar.org

Jaime Borrero
Ing. Agrónomo, Universidad Nacional de Colombia – Palmira
Especialista en Fitomejoramiento
M.Sc. en Producción Vegetal (énfasis en Fitomejoramiento)
Universidad Nacional de Colombia – Palmira
Investigador, Programa de Arroz
CIAT**
j.borrero@cgiar.org

Silvio J. Carabalí
Biólogo, Universidad Santiago de Cali
M.Sc. en Fitomejoramiento de Plantas, Universidad Nacional de Colombia – Palmira
Investigador, Programa de Arroz
CIAT**
sjcarabali@hotmail.com

* Universidad de Córdoba, Montería, Colombia. Tel.: 57 4 7860255.

** Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), Apartado aéreo 6713, Cali, Colombia. Tel.: 57 2 4450000.

Jairo Clavijo
Ph.D., Fisiología Vegetal y Manejo de Malezas, Universidad del Estado de Michigan, EE.UU.
Investigador, Fedearroz, Colombia
Profesor, Universidad del Estado de Louisiana, EE.UU.
Bogotá, Colombia
jairoclavijo@hotmail.com
jairoclavijo@yahoo.com

Fernando Correa
Ph.D., Fitopatología, Universidad del Estado de Michigan, EE.UU.
Investigador, Proyecto Patología de Arroz
CIAT
Actualmente: RiceTec, Inc.
Alvin, TX, EE.UU.
fcorrea@ricetec.com

Maribel Cruz
Agrónoma, Universidad Nacional de Colombia – Palmira
Magister en Ciencias, área de Entomología Agrícola, Universidad del Valle
Mejoradora zona templada FLAR
CIAT**
maribel.cruz@cgiar.org

Roger Enrique Charry
Ing. Agrónomo, Universidad de Córdoba
Candidato M.Sc. en Ciencias Agrícolas
(énfasis en Fisiología Vegetal)
Universidad de Córdoba*
rochame518@hotmail.com

Marc Châtel
Doctor en Fitomejoramiento, Universidad de París
Proyecto CIAT/CIRAD
Centro de Cooperación Internacional en Investigación Agrícola para el Desarrollo (CIRAD), Montpellier, Francia, y
CIAT**
m.chatel@cgiar.org

Víctor Degiovanni
Ing. Agrónomo, Universidad de Córdoba
M.Sc. en Fisiología de Cultivos, Universidad Nacional de Colombia – Bogotá
Docente Investigador, énfasis en cultivo de arroz
Departamento de Agronomía
Facultad de Ciencias Agrícolas
Universidad de Córdoba*
vdegiovanni@sinu.unicordoba.edu.co
victordegiovanni@yahoo.com

Myriam Cristina Duque
Matemática, Facultad de Ciencias, Universidad del Valle
Matemática y Consultora en Estadística
Programa de Arroz (América Latina y el Caribe)
Unidad de Agrobiodiversidad y Biotecnología
CIAT**
m.duque@cgiar.org

Albert Fischer
Ph.D., Fisiología Vegetal y Manejo de Malezas, Universidad del Estado de Oregon, EE.UU.
Profesor investigador, Weed Science in Rice
Plant Sciences Department
Universidad de California, Davis
Davis, CA, EE.UU.
ajfischer@ucdavis.edu

Carlos A. Flor
Ing. Agrónomo, Universidad Nacional de Colombia – Palmira
M.Sc. en Suelos, Universidad Autónoma de México
(experiencia en capacitación e investigación en los países de América Latina y en el CIAT)
Profesor Asociado
Universidad Nacional de Colombia – Palmira
Palmira, Colombia
caflor@telesat.com.co

Cilia Fuentes
Ph.D., Plant & Weed Science, Universidad Laval, Quebec, Canadá
M.Sc. en Botánica, Ecología y Sistemática Vegetal (México y Colombia)
Decana, Facultad de Agronomía
Profesora titular, Facultad de Agronomía
Universidad Nacional de Colombia – Bogotá
Bogotá, Colombia
Tel.: 57 1 3165118
clfuentesd@unal.edu.co

Jaime Gómez
Ing. Agrícola, Universidad Nacional de Colombia
Gestión ambiental y recursos naturales, Universidad Politécnica de Madrid
(énfasis en recuperación de suelos degradados y en mecanización agrícola)
Docente investigador, énfasis en producción sostenible
Facultad de Ciencias Agrarias y Recursos Naturales
Universidad de los Llanos
Jefe de operaciones de campo, Estación Experimental Santa Rosa
CIAT**
Villavicencio, Colombia
Tel.: 57 8 6709877
jaimegomez965@hotmail.com

Juan Carlos Granados
Biólogo, Universidad Nacional de Colombia – Bogotá
Maestría en Sistemática Vegetal, Instituto de Ciencias Naturales, Universidad Nacional de Colombia – Bogotá
Docente Investigador
Universidad Nacional de Colombia – Bogotá
Bogotá, Colombia

Elcio P. Guimarães
Ph.D., Mejorador de Cultivos, Universidad del Estado de Iowa, EE.UU.
Director, Área de Investigación en América Latina y el Caribe
CIAT**
e.guimaraes@cgiar.org

Alfredo de J. Jarma
Ph.D., Ciencias Agropecuarias, Universidad Nacional de Colombia – Bogotá
(énfasis en Fisiología de Cultivos)
Docente Investigador, Fisiología Vegetal
Departamento de Agronomía
Facultad de Ciencias Agrícolas
Universidad de Córdoba*
ajarma@sinu.unicordoba.edu.co
ajarma24@yahoo.com

Víctor Hugo Lozano
Técnico, Proyecto Colaborativo IRD-CIAT
Desarrollo de líneas como puentes en cruces interespecificos
CIAT**
tarugo57@hotmail.com

César P. Martínez
Ph.D., Mejoramiento de Plantas, Universidad del Estado de Oregon, EE.UU.
Líder, Programa de Arroz
CIAT**
c.p.martinez@cgiar.org

Sara Mejía de Tafur
Ing. Agrónoma, Universidad de Caldas
M.Sc. en Fisiología de Cultivos, Universidad Nacional de Colombia
Profesora asociada, Nutrición mineral de las plantas
Investigadora: Universidad Nacional y Colciencias
Directora, Depto. de Investigación y Ciencias Básicas
Universidad Nacional de Colombia – Palmira
Palmira, Colombia
smejiat@palmira.unal.edu.co

Juan Carlos Menjívar
Doctor en Ciencia del Suelo, Universidad de Granada, España
M.Sc. en Suelos y Aguas, Universidad Nacional de Colombia – Palmira
Profesor Asociado
Director de Área Curricular, Ciencias Agrícolas
Coordinador, Programas de Posgrado en Facultad de Ciencias Agropecuarias
Universidad Nacional de Colombia – Palmira
Palmira, Colombia
jcmenjivarf@palmira.unal.edu.co

Fabio Montealegre
Ing. Agrónomo, Universidad del Tolima
Maestría en Manejo de Malezas, Universidad Nacional de Colombia – Bogotá
Investigador, Federación Nacional de Arroceros (Fedearroz)
El Espinal (Tolima), Colombia
Cel.: (315) 3734262
infams@hotmail.com

Rafael A. Montoya
Ing. Agrónomo, Universidad de Córdoba
M.Sc. en Ciencias Agrícolas, Universidad Nacional de Colombia – Bogotá
(énfasis en Fisiología de Cultivos)
Docente Investigador, Departamento de Agronomía
Facultad de Ciencias Agrícolas
Universidad de Córdoba*
rmontoya@sinu.unicordoba.edu.co
ramoba1553@latinmail.co

Armando Osorio
Ing. Agrónomo, Universidad Nacional de Colombia – Bogotá
Maestría en Ciencias Agrarias y Malherbología, Universidad Nacional de Colombia – Bogotá
Profesor Investigador, Facultad de Agronomía
Universidad Nacional de Colombia – Bogotá
Bogotá, Colombia
aosorio@unal.edu.co

Yolima Ospina
Agrónoma, Universidad de los Llanos
M.Sc. en Fitomejoramiento de Plantas, Universidad Nacional de Colombia – Palmira
Investigadora, Proyecto CIAT/CIRAD
Centro de Cooperación Internacional en Investigación Agrícola para el Desarrollo CIRAD), Montpellier, Francia, y
CIAT**
y.ospina@cgiar.org

Wilson Piedrahíta
Ing. Agrónomo, Universidad Nacional de Colombia – Medellín
M.Sc. en Docencia Universitaria, Universidad de La Salle – Bogotá
Profesor asociado, Facultad de Agronomía
Universidad Nacional de Colombia – Bogotá
Bogotá, Colombia
wpiedrahita@unal.edu.co

Rafael Posada
Ph.D., Economista Agrícola, Universidad de Purdue, EE.UU.
Especialista en Seguimiento y Evaluación de Proyectos
(investigación agropecuaria e innovación rural)
Asesor, Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología Agropecuaria
Miembro, Junta Directiva de la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (CORPOICA)
Anteriormente: Evaluación de Prioridades de Investigación, CIAT
rafaciat@hotmail.com

Edward L. Pulver
Ph.D., Biología y Producción Integrada de Cultivos
Centro de Investigación en Pesticidas, Universidad del Estado de Michigan, EE.UU.
Agrónomo Consultor
Fondo Latinoamericano para Arroz de Riego (FLAR)
CIAT**
www.flar.org
e.pulver@cgiar.org

Guillermo Riveros
Ph.D., Fisiología Vegetal, Universidad de California, Davis, EE.UU.
Consultor, Fisiología de Cultivos, CORPOICA
guilloriveros@hotmail.com

Francisco Rodríguez
Técnico, Proyecto Colaborativo Arroz CIRAD-CIAT
Centro de Cooperación Internacional en Investigación Agrícola para el Desarrollo (CIRAD), y
CIAT**
Estación Experimental Santa Rosa, Villavicencio, Colombia
frodriguezarroz@gmail.com

Nubia Stella Rodríguez
Bióloga, Universidad de los Andes – Bogotá
M.Sc., Fisiología Vegetal, Universidad Nacional de Colombia
Fisióloga, CORPOICA
Villavicencio, Colombia
nrodriguez@telesat.com.co

Luis Roberto Sanint
Ph.D., Economía Agrícola, Universidad de Texas A&M, EE.UU.
(énfasis en Finanzas Agrícolas)
Productor agropecuario
Acarigua, Estado Portuguesa, Venezuela
lrsanint@gmail.com

James Silva
Estadístico, Universidad del Valle
Asistente de Investigación
Programa de Arroz, CIAT
Actualmente: Universidad del Estado de Louisiana
Baton Rouge, LA, EE.UU.
polluelo05@gmail.com

Eddie Tabares
Biología y Química, Universidad Santiago de Cali
(Gestión medioambiental, Universidad Autónoma de Occidente, Cali)
Investigador, Unidad de Agrobiodiversidad y Biotecnología
CIAT**
eddietabares@gmail.com

Joe Tohme
Ph.D., Manejo de Cultivos
Universidad del Estado de Michigan, EE.UU.
Director, Área de Investigación en Agrobiodiversidad
CIAT**
j.tohme2@cgiar.org

Edgar A. Torres
Agrónomo, Universidad Nacional Experimental de los Llanos Orientales Ezequiel Zamora (UNELLEZ), Barinas, Venezuela
Ph.D., Genética y Mejoramiento de Plantas
Escola Superior de Agricultura Luis de Queiroz (ESALQ), Piracicaba, Brasil
Fitomejorador, Programa de Arroz
CIAT**
e.a.torres@cgiar.org

Bernal E. Valverde
Ph.D., Fisiología de Plantas
Universidad del Estado de Oregon, EE.UU.
Profesor, Manejo de Malezas
Universidad de California, Davis, CA, EE.UU.
Científico visitante (Weed Science)
The Royal Veterinary & Agricultural University
Taastrup, Dinamarca
bev@kvl.dk

José Patricio Vargas
Ing. Agrónomo, Universidad del Tolima
M.Sc. en Agronomía, Universidad de Filipinas
(énfasis en fisiología y nutrición de la planta de arroz)
Investigador, especialista en producción de arroz (IRRI)
Consultor, Cultivo del Arroz
Villavicencio, Colombia
jpatriciovargas@hotmail.com

Gonzalo Zorrilla de San Martín
Ing. Agrónomo, Universidad de la República de Uruguay
M.Sc. en Manejo y fisiología de cultivos, Universidad del Estado de Iowa, EE.UU.
Director, Fondo Latinoamericano para Arroz de Riego (FLAR)
CIAT**
Km 281, Ruta 8 – INIA Treinta y Tres
Treinta y Tres, 33000, Uruguay
Tel.: 59 8 4522023/2305 – Interno 1209
g.zorrilla@cgiar.org

BLANCA

xxii

Publicación CIAT No. 365

Programa de Arroz
y
Comunicaciones Corporativas y
Fortalecimiento de Capacidades (CCC)

Edición técnica:	Francisco Motta
Edición de producción:	Gladys Rodríguez
Producción:	Oscar Idárraga (diagramación) Julio César Martínez (diseño de carátula)
Impresión:	Imágenes Gráficas S.A., Cali, Colombia

INTRODUCCIÓN

BLANCA

Capítulo 1

Nuevos retos y grandes oportunidades tecnológicas para los sistemas arroceros: Producción, seguridad alimentaria y disminución de la pobreza en América Latina y el Caribe

Luis Roberto Sanint

Contenido

	Página
Resumen	3
Abstract	4
Introducción	5
Cultivo y producción	5
Consumo y nutrición	6
Oportunidades y medio ambiente	7
Agrobiodiversidad	7
Asentamientos	7
Economía y desarrollo	8
Empleo e ingreso	8
Ciencia y tecnología	8
Género	8
Política económica	8
Retos y oportunidades para el arroz en ALC	9
Mejor nutrición y mayor seguridad alimentaria	9
El recurso hídrico en la ecología del arroz	9
Protección del medio ambiente	10
Mayor productividad con nuevas tecnologías	10
Inclusión del arroz en el contexto institucional	11
Conclusiones	12
Referencias bibliográficas	12

Resumen

Se revisa la situación del arroz a nivel mundial y, en especial, en América Latina y el Caribe (ALC), con énfasis en su importancia para la seguridad alimentaria y la reducción de la pobreza en esta región. Gracias a la rápida adopción de variedades mejoradas, la producción de arroz en ALC se triplicó entre 1985 y 2005, llegando a 25 millones de toneladas de arroz 'paddy' (arroz en cáscara). Al mismo tiempo, el área sembrada se mantuvo en

6 millones de hectáreas porque las áreas en que se producía arroz de secano han sido reemplazadas rápidamente por cultivos de riego. En 1976, el arroz de secano ocupaba más de 6 millones de hectáreas, o sea, más del 75% del área sembrada en ALC. La incursión de las nuevas variedades semi-enanas en los años 70 despojó al arroz de secano de su habilidad competitiva frente al arroz con riego, pues no pudo superar los rápidos y crecientes rendimientos y la disminución de los costos de producción unitarios de las áreas irrigadas. Actualmente, el área de producción de arroz de secano ha disminuido hasta menos de 2.5 millones de hectáreas (40% de todo el arroz cultivado en ALC), de las cuales la mayoría se encuentra en el Cerrado de Brasil. El rendimiento promedio de arroz de secano de 3.8 t/ha es aún bajo; por lo tanto, el manejo de este sistema de cultivo debe cerrar la brecha de rendimiento, permitiendo que las variedades expresen todo su rendimiento potencial. Se calcula que, si en 12 países de ALC la producción de arroz se incrementara en un 27% por el cierre de la brecha de rendimiento, la producción aumentaría en 2.7 millones de toneladas métricas. En el siglo XX, el consumo pasó de menos de 10 kg/capita por año a cerca de 30, y el nivel de autosuficiencia de la región se mantuvo en 90%. La reducción de la capacidad de investigación agrícola y de extensión rural a nivel gubernamental ha convertido a las instituciones del sector público en socios cruciales de los arroceros. En 1995, varios países de ALC crearon el Fondo Latinoamericano para Arroz de Riego (FLAR), el cual es financiado, en gran parte, por el sector arrocero de los países; participan en esa financiación las instituciones nacionales e internacionales de investigación, además de algunos socios del Fondo pertenecientes al sector privado. Se analizan los retos y oportunidades del arroz en ALC, en particular su participación en la nutrición y la seguridad alimentaria de la población de menores recursos económicos, y se resalta el potencial de ALC para convertirse en la despensa arrocera del mundo, debido a que posee abundantes reservas de agua, tierra y recursos humanos y tecnológicos.

Abstract

New challenges and great technological opportunities for rice systems: Production, food security, and mitigation of poverty in Latin America and the Caribbean

The status of rice production worldwide and particularly in Latin America and the Caribbean (LAC) is examined, highlighting the important role it plays in food security and in the reduction of poverty in the region. Thanks to the rapid adoption of improved varieties, rice production tripled in LAC between 1985 and 2005, reaching 25 million tons paddy rice. At the same time, the area planted to the crop remained stagnant at 6 million hectares, as upland rice has been quickly replaced by irrigated rice. In 1976, over 6.0 million hectares were planted to upland rice, accounting for over 75% of the region's rice-growing area. With the introduction of new semi-dwarf varieties in the 1970s, upland rice lost its ability to compete with irrigated rice because of the latter's rapid increase in yields and the decrease in unitary production costs. The area planted to upland rice has now plunged to less than 2.5 million hectares (40% of the area planted to rice in LAC), located mainly in the Brazilian *cerrados*. The average yield of upland rice, 3.8 t/ha is still low. To close the gap, improved crop management practices are needed so that varieties can fully express their yield potential. Estimates are that rice production in the 12 LAC countries could increase by 27%, in other words by 2.7 million MT. In the 20th century, consumption increased from less than 10 to close to 30 kg/capita per year. The region's level of self-sufficiency has remained at around 90%. The reduced capacity of governmental institutions for agricultural research and rural extension has forced public institutions to become crucial partners of rice farmers. In 1995, several LAC countries created the Latin American Fund for Irrigated Rice (FLAR), which is mainly funded by the

rice sectors of member countries, with the participation of national and international research institutions as well as partners of the private sector. The challenges and opportunities of the LAC rice sector, especially its participation in the nutrition and food security of the low-income population, are analyzed and the potential of this region to become the rice basket of the world is highlighted in view of its abundant water, land, human, and technological resources.

Introducción

El arroz es vida fue el lema del Año Internacional del Arroz celebrado en el 2004, y la frase encaja muy bien en la región de América Latina y el Caribe. El arroz tiene un papel importante como alimento básico, y los sistemas agrícolas con que se produce arroz son esenciales para la seguridad alimentaria, la disminución de la pobreza y el mejoramiento del estilo de vida de una población. El arroz se convirtió en un producto agrícola importante y en un cultivo generador de ingresos a lo largo del siglo XX. Evolucionó desde un cultivo pionero, principalmente de secano, en la frontera agrícola durante la primera mitad de ese siglo hasta convertirse en un cultivo altamente tecnificado y productivo, en el que ha predominado, en las últimas décadas, el sistema de riego.

Cultivo y producción

El arroz se cultiva en 113 países de todos los continentes del mundo (a excepción de la Antártida). De esos países, los 26 que pertenecen a la región de ALC producen 25 millones de toneladas de 'paddy' (arroz con cáscara) que representan el 4% (FAOSTAT, 2004) de la producción mundial de arroz, que es de 592 millones de toneladas (promedio del período 2000-2002). El área cultivada con arroz en ALC es de 5.9 millones de hectáreas, aproximadamente. La tasa anual de crecimiento de la producción entre 1961 y 1991 (2.9% anual) fue casi idéntica en Asia y en ALC. En Asia, la mayor parte de este crecimiento se debe al aumento de la productividad (79%); en ALC el aumento del rendimiento fue de 51%. Entre 1995 y 2005, la producción total del arroz en ALC mejoró un 1.9% y un 1.3% en Asia, mientras que los rendimientos por hectárea aumentaron 3.8% por año en ALC y 1.0% en Asia. En ALC, el área destinada al cultivo del arroz decreció en 1.8% por año (Cuadro 1).

Desde 1967, más de 300 variedades de arroz fueron lanzadas al mercado en ALC (cerca de 10 por año), y la gran mayoría (90%) pertenecía al sistema de cultivo con riego. De esas nuevas

Cuadro 1. Tasas anuales de crecimiento del arroz 'paddy' (%) en tres regiones del mundo, y en dos períodos desde mediados del siglo XX.

Región	1961-1991			1992-2002		
	Producción	Rendimiento	Área	Producción	Rendimiento	Área
Asia	2.9	2.3	0.6	1.3	1.0	0.3
África	2.7	0.4	2.3	2.6	0.3	2.3
ALC	2.9	1.5	1.4	1.9	4.18	-1.8
Mundo	2.7	2.1	0.7	1.4	1.1	0.3

FUENTE: FAOSTAT, 2003.

variedades, 40% provenían de cruces realizados en el Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT) y muchas de las restantes tenían progenitores del CIAT o del Instituto Internacional de Investigaciones sobre el Arroz (IRRI). Las variedades modernas semienanas (las MSV, en inglés) representan el 93% de toda la producción de arroz con riego y más del 80% de toda la producción de arroz de la región. El rendimiento promedio en las áreas con riego se incrementó de 3.3 t/ha (el de mediados de los 60) a 4.55 t/ha en el 2002, y la producción total de arroz casi se triplicó entre 1967 y 2002 cuando llegó a más de 22 millones de toneladas de arroz 'paddy'.

El arroz fue un *cultivo pionero* en la primera parte del siglo XX, cuando las variedades de arroz de secano, tanto tradicionales como mejoradas, se adaptaron a los suelos ácidos de las sabanas tropicales, a los valles y a las zonas vecinas a los bosques del trópico. El área empleada por el sistema de secano pasó de más de 6 millones de hectáreas, en 1976 —es decir, más del 75% del área arrocera de la región latinoamericana— a cerca de 2.5 millones de hectáreas al finalizar el siglo XX. Actualmente, el arroz de secano se siembra en 2.5 millones de hectáreas (40% del área cultivada en ALC), la mayor parte de las cuales está en el Cerrado de Brasil.

El papel del arroz en el desarrollo agrícola y en el progreso rural de ALC ha sido notorio. Uno de los grandes logros de las tecnologías de arroz en ALC es haber contribuido a *triplicar la producción* en un área sembrada que no creció. Este resultado se debió a los rendimientos más altos obtenidos en el sector con riego y es un vivo ejemplo del efecto que tienen esos rendimientos, que son crecientes y se obtienen en los ecosistemas favorables, en otros sistemas menos favorecidos y más frágiles. El costo unitario de producción del arroz cayó más del 50% en términos reales, descenso que fue acompañado por una caída similar en los precios al consumidor. El arroz dejó de ser un cultivo preferido en los ambientes menos favorecidos y su producción aumentó en las zonas con riego.

Consumo y nutrición

El arroz se ha convertido gradualmente en un *alimento básico* en la dieta de los consumidores del trópico latinoamericano. El consumo per capita de arroz blanco pasó de menos de 10 kg en los años 20 a cerca de 30 kg en los 90. Aunque se han presentado mejoras significativas en la producción de arroz en ALC, la demanda regional ha sobrepasado la producción. La región tiene un *déficit anual* cercano al millón de toneladas de arroz blanco.[1] El consumo aparente es, aproximadamente, de 30 kg per capita entre los 511 millones de habitantes de la región. Hay 14 países en el Caribe cuyo potencial para producir arroz es bajo y continuarán como importadores del grano. Otros 14 países de ALC tienen un pequeño déficit en la satisfacción de sus necesidades internas de arroz, pero cuentan con recursos naturales para apoyar la producción y satisfacer la demanda nacional; algunos hasta podrían exportar. Hay finalmente cuatro países que son exportadores importantes (Uruguay, Argentina, Guyana y Surinam).

1. Para actualizar cifras de producción, rendimiento, consumo y otras afines correspondientes a las décadas 1990-2000 y 2000-2010, el lector puede consultar fácilmente (en Internet o en impresos) los informes periódicos de la FAO o de instituciones del sector arrocero.

En el mundo en desarrollo, tomado como un todo, el arroz provee el 27% del suplemento energético de la dieta diaria y 20% de la proteína que ésta requiere. El arroz es el cultivo de grano más importante para el consumo humano en los países tropicales de la región de ALC, porque proporciona *más calorías* a la dieta de los habitantes de esa región que el trigo, el maíz, la yuca, la papa y otros alimentos.

En la zona tropical de este subcontinente, el arroz se ha establecido como un producto agrícola que genera buenos ingresos. Esto ha ocasionado quizás una tendencia alcista notoria en el consumo total durante los últimos 15 años en países altamente consumidores como Ecuador, República Dominicana, Cuba, Perú, Brasil y Colombia. El arroz es también la fuente principal de calorías y proteínas en zonas urbanas como São Paulo, Río de Janeiro, Porto Alegre, Panamá, Barranquilla y Guayaquil. En Brasil, el mayor productor de la región de ALC (aporta la mitad de la producción total), sus habitantes consumen 60 kg (arroz 'paddy') per capita al año, que equivalen a 400 calorías diarias. El consumo promedio de la región está aún lejos del que se registra en los países asiáticos.

Cerca de la mitad de la población de ALC vive por debajo de la línea de pobreza de acuerdo con estudios de la FAO,[1] y en la zona tropical de la región el ingreso de esa población es muy bajo. La compra de alimentos supera el 50% del total de los gastos de los más pobres y de ese gasto alimentario el arroz representa cerca del 15%. Ahora bien, la caída de los precios del arroz en cerca del 50% en términos reales benefició, principalmente, a los pequeños consumidores del grano (Sanint et al., 1998).

Oportunidades y medio ambiente

Agrobiodiversidad

La aparición de las variedades semienanas en los años 70 despojó al arroz de secano de su habilidad competitiva ante el rendimiento creciente y los costos de producción descendentes de las áreas de riego. La producción proviene cada vez más de los valles en que hay condiciones para el sistema de arroz con riego cuya productividad es muy alta. Además, éste y otros sistemas basados en el arroz albergan una amplia biodiversidad, que se manifiesta en la notable variedad de enemigos naturales que controlan los insectos dañinos y otras plagas del cultivo.

Asentamientos

En ALC, el arroz es la clave del establecimiento y la renovación de pasturas en Uruguay, en Argentina y, principalmente, en Brasil (sistema de secano en el Cerrado y áreas con riego en el sur templado del país). En esa zona templada, los sistemas de cultivo de arroz incluyen vacunos y ovejas. En el Cerrado, el arroz es un cultivo de rotación muy importante, en especial en el binomio arroz/soya. Entre 1960 y 1970, el arroz de secano fue uno de los cultivos preferidos en las áreas de asentamiento situadas en los márgenes del bosque tropical, pero la caída de sus precios, asociada con el alto rendimiento y el costo unitario bajo del sistema de riego, lo situaron debajo del maíz, de la yuca y del algodón, principalmente; este cambio ocurrió en países de América Central, en Colombia y en Ecuador. En Brasil, Perú y Bolivia, el arroz es aún importante para los habitantes de los márgenes del bosque. En varias áreas de riego, el arroz es el único cultivo económicamente viable y es una herramienta muy útil en el manejo eficiente de los ecosistemas respectivos.

En general, los sistemas basados en arroz ofrecen muy buenas oportunidades para mejorar la nutrición, diversificar la agricultura, incrementar el ingreso de los cultivadores, y proteger los recursos genéticos y los del medio ambiente agrícola.

Economía y desarrollo

Empleo e ingreso

El cultivo del arroz representa la actividad y la fuente de ingreso más importantes de más de 100 millones de personas en Asia y en África.[1] Muchos países de estos continentes son altamente dependientes del arroz, tanto como fuente de ingresos como por intercambios y rentas de los gobiernos. En ALC hay aproximadamente 1 millón de productores de arroz. Esta actividad arrocera ha desarrollado conexiones entre el molino, la mecanización y la comercialización. La trilla, el 'molinado', el procesamiento del grano, el transporte y el manejo en poscosecha del arroz ayudan a la *generación de ingresos* de muchos habitantes de las zonas rurales. Muchas actividades de la producción del arroz, del manejo del cultivo, del mantenimiento y operación de herramientas, implementos y equipos, y de la poscosecha son fuentes adicionales de ingreso para los agricultores.

El arroz requiere también muchos servicios profesionales, causa efectos indirectos en el empleo, la inversión y el crecimiento regionales, y tiene un importante efecto multiplicador en la demanda agregada, tres acciones económicas que han llegado a crear 'Regiones Arroceras' y 'Municipios Arroceros' donde el arroz es la vida de las comunidades. En El Espinal (municipio de Colombia con 70,000 habitantes), el arroz representa cerca del 50% del empleo y del ingreso de los hogares (Fedearroz, 2004).

Ciencia y tecnología

Las tecnologías mejoradas permiten a los agricultores sembrar más arroz en áreas en que hay limitaciones de recursos, porque al aplicarlas emplean menos agua y necesitan menos trabajo y menor cantidad de agroquímicos. Este desarrollo científico es convergente y significativo, y va desde el nuevo conocimiento biológico hasta los descubrimientos en todos los ámbitos de la ingeniería (por ejemplo, en diseño de maquinaria, en irrigación y en manejo del grano en poscosecha), en las ciencias sociales, en el manejo agronómico, en la estadística y en otros campos. Ahora bien, la confluencia de la abundancia informativa, de los recursos físicos y monetarios, y de la actitud de los distintos grupos sociales hacia el avance científico han configurado una amplia gama de sistemas de cultivo de arroz en ALC.

Género

Las mujeres y los hombres del campo suelen desarrollar diferentes habilidades en el manejo del cultivo y acumulan distintos conocimientos agrícolas. Las mujeres contribuyen mucho a la producción del arroz y desempeñan un papel importante en las actividades de cosecha y poscosecha, especialmente en los sistemas tradicionales de cultivo en la frontera agrícola de ALC. Es notable su trabajo en la operación de transplante en Perú.

Política económica

Durante décadas, el arroz fue uno de los productos básicos más protegidos. Esta situación cambió desde los años 80, cuando algunos programas nacionales hicieron ajustes estructurales y se pactó el Acuerdo sobre Agricultura de la Organización Mundial del Comercio en 1994. El comercio mundial del arroz se

ha expandido en forma notable y pasó de 14 millones de toneladas de arroz blanco en 1994 a 27 millones de toneladas en la actualidad. Hoy en día, el arroz es el *cultivo más subsidiado* en el mundo pues recibe más de US$20,000 millones al año. Aunque los beneficios derivados de esta política (especialmente el precio bajo por kilo) son disfrutados por los consumidores urbanos, muchos pobladores rurales (y algunos urbanos) de los países en desarrollo enfrentan los efectos del desempleo asociado con la reducción, debida a la producción externa subsidiada, de la capacidad de producción nacional. Los países en desarrollo deben abogar por políticas comerciales más justas y por prácticas comerciales más abiertas, donde todos, productores y consumidores del arroz, puedan disfrutar de los beneficios asociados con una distribución más eficiente de los recursos.

Retos y oportunidades para el arroz en ALC

El Año Internacional del Arroz procuró analizar los sistemas basados en arroz para situarlos en un marco global que facilitaría su coordinación. El objetivo era aprovechar positivamente, mediante un manejo adecuado, el potencial de dichos sistemas. La siguiente discusión esboza las ideas que generó ese estudio a nivel global y las ubica en la perspectiva del sector arrocero de ALC.

Mejor nutrición y mayor seguridad alimentaria

El arroz debe continuar consolidándose como un alimento importante en ALC. Debe mantener la ventaja de ser una fuente económica de energía para los pobres, debe producirse a nivel local para poder explotar adecuadamente sus *ventajas comparativas*, y debe mantenerse, además, como una base productiva que genere empleo e ingresos. En muchos países de ALC es muy bajo el consumo per capita de arroz, y en ellos se ofrece arroz de alta calidad (con bajo contenido de arroz quebrado) a precios relativamente altos. Este arroz no puede competir bien con otros productos disponibles que ofrecen carbohidratos, como el trigo, la yuca, el plátano, la papa o el maíz.

El mercado de los productos de arroz debe ofrecer a los grupos sociales de bajos ingresos un arroz de menor calidad pero más económico y, a otros consumidores, productos con valor agregado, como los alimentos semipreparados, los elaborados, etc. La seguridad alimenticia del sector rural de los países de ALC enfrenta hoy un reto grande e ineludible: desarrollar alternativas viables para que los cultivos generadores de ingresos, como el arroz, neutralicen los altos subsidios que reciben los cultivadores de los países desarrollados. Este desafío implica un doble esfuerzo: incrementar, de un lado, la *eficiencia de producción* de arroz en ALC, y vigilar, del otro, la política comercial injusta del mercado mundial para asegurar la competitividad del arroz de ALC en los mercados interno y externo.

El recurso hídrico en la ecología del arroz

Hay una creciente preocupación acerca de la sostenibilidad de los recursos hídricos mundiales. En América Latina prevalecen tres enfoques, que señalan la escasez hídrica actual en los sistemas arroceros. Los dos primeros se refieren a la demanda y al uso:

- Reducir la cantidad de agua que requieren los cultivos.
- Justificar el uso del agua para múltiples propósitos; por ejemplo, para el riego y la acuacultura.

- Estimular las capturas de agua, el abastecimiento de agua y el aprovechamiento eficiente de los ciclos del agua en la atmósfera y en el resto del medio ambiente.

La región de ALC, que tiene agua en abundancia (Cuadro 2), requiere que sus productores de arroz, que son grandes utilizadores de este recurso, sean vigilantes y promuevan la inversión en los *procesos de captura y de conservación* del agua. El Año Internacional del Arroz se concentró en hacer concientes, a muchos beneficiarios del agua que irriga los campos de arroz, de las diversas formas de vida que sobreviven en un sistema arrocero. Impulsó además el manejo de un cultivo de arroz con menos agua, pero usada con *más eficiencia*, y la urgencia de prever, a largo plazo, las necesidades hídricas de los sistemas y las inversiones que se requieran.

Protección del medio ambiente

Los productores de arroz tienen que compartir la creciente preocupación por la protección del medio ambiente. Actualmente, en los países de ALC debe ser obligatorio prestar atención, respecto al arroz con riego y al de secano favorecido, a los siguientes aspectos:

- *Eficiencia* en el uso de los recursos, que permita al sistema de cultivo en cuestión reducir la presión excesiva que experimente cuando haga uso intensivo de un recurso (agua o suelo).
- Incremento de los *rendimientos* sin aumentar el uso de los recursos (un reto mayor que el anterior).
- *Precisión* grande en las operaciones de producción y en el tiempo empleado en ellas (una respuesta crucial a los retos anteriores).

Mayor productividad con nuevas tecnologías

En la mayoría de las variedades de arroz y, especialmente, en las consideradas de alto rendimiento y en los híbridos, el *rendimiento potencial* supera al rendimiento actual. Hay, además, una variación considerable en el nivel de rendimiento que se logra en sistemas de producción similares. Los sistemas de arroz con riego y de secano favorecido aportan, aproximadamente, el 70% de toda la producción de arroz de ALC; además, en la región los genotipos de alto rendimiento ocupan más del 90% del área sembrada con arroz. Ahora bien, el rendimiento registrado (actual) de las variedades que están a disposición de los agricultores (incluyendo varias de alto rendimiento y algunos híbridos) permanece muy por debajo de su rendimiento potencial. La diferencia entre estos dos valores del rendimiento

Cuadro 2. Disponibilidad hídrica per capita por continente (en miles de m^3) entre 1950 y 2000.

Continente o región	Año				
	1950	1960	1970	1980	1990–2000
África	21.0	17.0	13.0	9.4	5.1
Asia	10.0	8.0	6.0	5.1	3.3
América Latina	105.0	80.0	62.0	48.8	28.3
Europa	6.0	5.0	5.0	4.4	4.1
América del Norte	37.0	30.0	25.0	21.3	17.5

FUENTES: FAO, 1996; 2000.

se denomina la *brecha del rendimiento*. Esta brecha se registra en todas las tierras cultivadas con arroz con riego y en todos los países de ALC, y cerrarla o eliminarla representa una oportunidad inmediata para incrementar la producción de arroz en esa región.

La brecha del rendimiento varía según el país o la zona de producción. El rendimiento potencial del arroz con riego es más alto en las regiones templadas del Cono Sur de América del Sur porque las condiciones climáticas son allí muy favorables. En la zona tropical, ese rendimiento potencial es menor. Aunque se pueden obtener dos cosechas al año en el trópico, la brecha del rendimiento es, en porcentaje, casi la misma que la observada en las regiones templadas del sur, en razón del bajo rendimiento registrado en varios lugares del trópico suramericano y de América Central. Se calcula que, si se cerrara la brecha del rendimiento en 12 países de ALC, el incremento total en la producción de arroz sería de 2.7 millones de toneladas.

Ahora bien, las *tecnologías* que usan eficientemente los recursos y que permiten, por ello, cerrar la brecha del rendimiento están ya disponibles. Pulver et al. (2000) y Sanint et al. (1998) mencionan las principales (variedades mejoradas, uso eficiente del agua, control biológico de plagas). Sólo falta introducirlas, modificarlas según las condiciones locales, y ofrecerlas a todos los agricultores. La *transferencia* de estas tecnologías es decisiva para lograr ese objetivo. El enfoque económico y sostenible que darían las asociaciones de agricultores a la generación de conocimientos sobre el arroz y a la transferencia de las tecnologías derivadas permitirá mejorar los sistemas nacionales de producción de arroz para salvar la brecha del rendimiento.

Inclusión del arroz en el contexto institucional

A consecuencia de la reducción ocurrida en años anteriores en la capacidad pública, tanto de investigación agrícola como de extensión rural, las instituciones del sector privado se han convertido en socios muy importantes de la actividad agrícola de los países. En 1995, varios países de ALC crearon el Fondo Latinoamericano para Arroz de Riego (FLAR) y continuaron desarrollándolo en los años siguientes. Es éste un *nuevo modelo* institucional de investigación y desarrollo financiado, en gran parte, por el sector arrocero, que incorpora instituciones de investigación pública, tanto nacionales como internacionales, además de entidades del sector privado. El FLAR realiza un trabajo pionero en la investigación agrícola internacional. Actualmente, los socios aportan al FLAR cerca de U$600,000 anuales para sus actividades. El Fondo se orientó inicialmente al desarrollo de germoplasma, pero el manejo del cultivo empezó a recibir de él mayor atención desde el 2003 cuando el Fondo Común para los Productos Básicos (CFC, en inglés) le otorgó, por medio de la FAO, casi U$1 millón para un proyecto de 3 años dirigido a cerrar la brecha de rendimiento en el sistema de riego en Venezuela y Brasil. Más de una década después de su fundación, el FLAR enfrenta aún el reto de asegurar su permanencia. Los socios del FLAR son de naturaleza diversa, tienen variados intereses técnicos y comerciales y aplican paradigmas conflictivos, pero todos conocen la importancia de la *cooperación internacional*, de la innovación y de la inversión en investigación y tecnología, dentro de un esquema que les evita la duplicación de esfuerzos.

La reducción de fondos que experimentan tanto la investigación

pública como el esfuerzo investigativo de varias instituciones internacionales plantea también un desafío a la sostenibilidad del sector agrícola en el plano nacional y en el internacional. La respuesta a esta situación debe ser la *agrupación de los recursos* de todas las instituciones involucradas y el fortalecimiento de las alianzas estratégicas entre los países y las regiones. El mundo necesitará cerca de 750 millones de toneladas de arroz para el año 2025, es decir, debe aumentar para entonces la producción actual en un 30%.[1] Pues bien, América Latina tiene los medios para contribuir, de manera significativa, a satisfacer esa *demanda adicional*. El manejo de los sistemas de cultivo en un nivel de *alta productividad* es la alternativa que tiene, a corto plazo, la mejor oportunidad de cerrar la brecha de rendimiento antes mencionada y de reducir los costos unitarios de producción. A mediano plazo, el mejoramiento varietal contribuirá a estos resultados y afrontará, además, nuevos retos. La sinergia que generen estas dos soluciones (manejo y mejoramiento) permitirá, sin duda, que la región de ALC consolide un sector arrocero altamente eficiente y competitivo a nivel mundial.

Conclusiones

Entre 1985 y 2005, América Latina *triplicó su producción* de arroz, a causa de la rápida adopción de variedades mejoradas. En ese lapso, el área sembrada se estancó en 6 millones de hectáreas, por dos razones: la producción del sistema de secano fue sustituida por la obtenida en el de arroz con riego, y las nuevas variedades elevaron considerablemente la productividad del cultivo (más arroz en menos área). El consumo creció y el arroz, convertido en un alimento importante para los habitantes más pobres de las zonas urbanas, elevó su nivel de autosuficiencia al 90%.

El rendimiento promedio del arroz 'paddy' es de 4.18 t/ha (el cultivado en secano es de 3.8 t/ha y el de arroz con riego es de 4.55 t/ha). Estas cifras son aún bajas y el manejo del cultivo debe *cerrar la brecha del rendimiento*, es decir, proporcionar las condiciones que permitan a las variedades expresar su alto rendimiento potencial. Este manejo mejorado es todavía una asignatura pendiente, pero científicos y agricultores la han abordado con éxito en los años recientes.

La región de ALC, que posee abundantes reservas de agua, de suelos y de población, tiene la capacidad de ser una *canasta de arroz* para el mundo. Lo logrará si responde al reto crucial de consolidar sus sistemas de generación y transferencia de tecnología y de explotar los conocimientos acumulados sobre el arroz. El FLAR, un modelo pionero en la investigación del arroz que se apoya, financiado por el sector arrocero, en instituciones de investigación internacionales y nacionales, públicas y privadas, debe ser un elemento integrador del sistema regional de desarrollo del arroz.

Referencias bibliográficas

ERS (Economic Research Service); USDA (United States Department of Agriculture). 2008. Rice outlook. Disponible en: http://usda.mannlib.cornell.edu/MannUsda/viewDocumentInfo.do?documentID=1285

FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación). 1996. Cumbre Mundial de la Alimentación. Memorias de la reunión celebrada en Roma del 13 al 17 de julio de 1996. Roma.

FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación). 2000. Cereales: Producción mundial en el decenio 1990-2000. Roma.

FAOSTAT. 2003. Anuario estadístico de la FAO; Hoja de balance de alimentos. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO), Roma. Disponible en: http://faostat.fao.org/site/567/default.aspx

FAOSTAT. 2004. Anuario estadístico de la FAO 2004. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO), Roma. Disponible en: http://faostat.fao.org

Fedearroz (Federación de Arroceros de Colombia). 2004. Evaluación socioeconómica de la cadena del arroz en el municipio de El Espinal. Bogotá, Colombia.

Pulver, E.L.; Tran, D.V.; Nguyen, V.N. 2000. Brecha de rendimiento en arroz con riego en América Latina y el Caribe. Informe de la Consulta a expertos sobre la brecha de rendimiento y el declive de productividad en la producción de arroz. FAO, Roma.

Sanint, L.R.; F.J. Correa-Victoria, F.J.; Izquierdo, J. 1998. Situación actual y aspectos de la producción de arroz en América Latina y el Caribe. Trabajo presentado en el XIX Consejo Internacional del Arroz auspiciado por la FAO (XIX FAO-IRC). FAO, Roma.

Capítulo 2

Tendencias en la producción mundial de arroz

Rafael Posada

Contenido

	Página
Resumen	14
Abstract	15
Introducción	15
Análisis comparativo 1979-1981 y 1999-2001	16
Distribución de las variables de producción	17
Comercio internacional	20
Precios internacionales del arroz blanco	21
El arroz y la emergente crisis de alimentos (2007-2008)	22
Conclusiones	24
Referencias bibliográficas	25

Resumen

Se analizan las tendencias de la producción mundial de arroz, incluyendo las principales variables como área, producción, rendimiento, comercio y precio internacional. Según las estadísticas mundiales, la productividad, medida en toneladas de arroz 'paddy' por hectárea, se ha incrementado en los últimos 28 años. Este resultado del mejoramiento tecnológico ha permitido que haya un abastecimiento mundial de arroz capaz de satisfacer la demanda sin necesidad de aumentar, en general, el área sembrada. La estructura de la producción mundial de arroz no presentó, en general, modificaciones significativas en los períodos analizados. En primer lugar se comparan los promedios trimestrales de los años 1979-1981 y 1999-2001, y en segundo lugar se revisan las cifras más recientes del ciclo 2007-2008. Asia sigue concentrando la mayor producción de este cereal: produce cerca del 90% del total mundial, es decir, más de 600 millones de toneladas de arroz 'paddy' (arroz cáscara) por año. Aunque el arroz es todavía un cultivo poco comercializado a nivel internacional —sólo se exporta el 7% de la producción total— se observan cambios relativamente significativos en las cifras del comercio internacional del arroz. Asia se ha consolidado como región exportadora, dando origen al 50% de las exportaciones mundiales de arroz. Asia es también el mayor importador de arroz con el 75% de las importaciones globales. Estos datos implican que un alto porcentaje del comercio internacional del arroz es intra-continental. Las cifras de comercio neto (importaciones–exportaciones) confirman esta afirmación. África, por su parte, es el único continente que presenta un balance positivo en las importaciones de arroz. El análisis de las cifras recientes (2007-2008) muestra que el escenario económico de la producción de arroz se verá influenciado principalmente por variables de orden exógeno

como el incremento del costo de petróleo, las políticas nacionales de seguridad alimentaria y la agudización de las variaciones climáticas que han inducido una emergente crisis de alimentos.

Abstract

Trends in world rice production

The trends of world rice production, including important variables such as area, production, yields, trade, and international price, are analyzed. World statistics indicate that rice productivity, measured in tons of paddy rice per hectare, has increased over the past 28 years as a result of technological improvements. The world rice supply is now capable of satisfying the demand for this staple without having to increase, in general, the area planted to the crop. During the time period covered by the study, no significant changes were observed in global rice production structure. The quarterly averages of the years 1979-1981 and 1999-2001 were initially compared, and then more recent figures, corresponding to the 2007-2008 growth cycle, were reviewed. Asia continues to be the world's grain production hub, accounting for nearly 90% of total production worldwide, in other words, more than 600 million tons of paddy rice per year. Although rice is still basically a noncommercial crop at the international level—only 7% of total production is exported—relatively significant changes have occurred in international rice trade figures. Asia has been consolidated as a rice exporter, accounting for 50% of world exports. It is also the region that imports the most rice, accounting for 75% of global imports. These data imply that a high percentage of international rice trade is intra-continental. Net trade figures (imports–exports) confirm this assertion. Africa, in turn, is the only continent that presents a positive financial balance in terms of rice imports. The analysis of recent figures (2007-2008) shows that the economic scenario for rice production will be mainly influenced by exogenous variables such as the increase in the cost of oil, national food security policies, and the aggravation of climate changes, which have triggered an emerging food crisis.

Introducción

Este artículo contiene un análisis de las tendencias de la producción mundial de arroz. En él se seleccionaron las principales variables, es decir, el área, la producción, el rendimiento, el comercio internacional y el precio internacional.

El ejercicio permitió actualizar las cifras empleadas en un análisis anterior, con corte a 1980, y con ellas se hizo un análisis comparativo de los promedios de dichas variables correspondientes a dos intervalos de tiempo: el promedio de 1979-1981 y el promedio de 1999-2001. También se analizaron las cifras correspondientes al período 2007-2008. El resultado del análisis indica que los aumentos en la productividad del arroz explican, en gran parte, los incrementos detectados en la producción total de arroz en las regiones productoras. Es ésta una prueba evidente de que la adopción de tecnología ha tenido un impacto importante y positivo en el cultivo del arroz.

Este análisis comparativo muestra también que los continentes estudiados, África, América, Asia y Europa, han mantenido su participación porcentual en la producción de arroz, pero han mejorado sus índices de autonomía. Es decir, las diferentes regiones del planeta satisfacen hoy un porcentaje más alto de su demanda con producción propia.

Los volúmenes de arroz blanco que se han comercializado a nivel internacional se han duplicado en 20 años (1985-2005). Los precios internacionales alcanzaron un máximo en 1996, decrecieron hasta el año 2000 y han vuelto a incrementarse de forma sostenida hasta el 2007.

Análisis comparativo 1979-1981 y 1999-2001

La producción de arroz 'paddy' ha evolucionado muy satisfactoriamente a nivel mundial, si se toma como indicador el aumento en productividad del cultivo. El análisis de las cifras globales de área, producción y rendimiento, partiendo de los promedios tri-anuales de 1979-1981 y de 1999-2001, son una prueba evidente de esta afirmación (Cuadro 1).

- El ***área*** sembrada aumentó, en términos absolutos, en 9 millones de hectáreas, que representan un incremento porcentual de 6%. En consecuencia, la tasa de crecimiento anual, en promedio, para el período analizado sería de 0.6%. Si esta tendencia continúa, la adición de nuevas tierras a la producción de arroz será relativamente pequeña en los próximos 10 ó 15 años. Esta tendencia tiene muy buenas implicaciones de tipo ambiental, especialmente respecto al uso del agua y a la contaminación ambiental por aplicación de agroquímicos.
- En contraste con la variable anterior, la ***producción*** física de arroz 'paddy', medida en toneladas métricas (TM), tuvo un incremento absoluto de 208 millones de TM, que representa un cambio porcentual de 53%. Es decir, en los 20 años considerados fue posible incrementar la producción de arroz a una tasa de crecimiento anual, en promedio, de 4.30%, una cifra superior al crecimiento anual promedio de la población. Este dato indica que la disponibilidad per cápita de arroz 'paddy', a nivel mundial, se incrementó. Si se tiene en cuenta que la disponibilidad es una de las variables críticas de la seguridad alimentaria, se puede afirmar que los productores de arroz han realizado bien su tarea.
- En consecuencia, el ***rendimiento*** físico de arroz, medido en TM/ha, presenta también un incremento significativo. En promedio, cada hectárea cultivada con arroz en el mundo está produciendo hoy 1 TM adicional de grano con respecto a lo que producía 20 años atrás. La tasa de crecimiento anual, en promedio, de dicho rendimiento en el período considerado ha sido de 3.3%.

Es obvio que una evolución tan notoria del rendimiento físico (en arroz 'paddy') del cultivo de este cereal a nivel mundial significa que hubo un profundo cambio tecnológico en el sector arrocero. Significa también que las inversiones

Cuadro 1. Estadísticas globales de arroz 'paddy' en dos épocas.

Variable económica	Promedio en 1979-1981	Promedio en 1999-2001	Cambio absoluto	Cambio relativo (%)
Área (millones de ha)	143.7	153.0	9.3	6
Producción (millones de TM)	394.0	602.8	208.8	53
Rendimientos (TM/ha)	2.8	3.9	1.1	39

FUENTE: FAOSTAT, 2004.

hechas tanto por el sector público como por el sector privado han tenido un efecto muy positivo. Los analistas esperan que este cambio tecnológico haya ocurrido en diferentes frentes, es decir, en un mejor uso de los suelos, en el uso más racional del agua, en el mejoramiento de la eficiencia tanto en la siembra como en la recolección, y en la disponibilidad de materiales genéticos que tengan un potencial de producción más alto y mayor resistencia a los limitantes bióticos y abióticos del cultivo.

Distribución de las variables de producción

Se puede afirmar que, en general, la distribución de las variables de producción de arroz 'paddy' en los cuatro continentes (América, África, Asia y Europa) no ha presentado variaciones significativas en los últimos 20 años; se toman como puntos de referencia los promedios antes mencionados de los años 1979-1981 y 1999-2001 (Cuadros 2 a 4).

Distribución del área

Asia sigue siendo el continente en que hay más área sembrada con arroz, es decir, cerca del 90% del total sembrado en el mundo. Es interesante anotar que, en el período analizado, el área sembrada con arroz 'paddy' en Asia se incrementó en 9 millones de hectáreas, es decir, en ese continente se presentó el mayor incremento en la utilización de tierra. No se esperaba ese incremento en los análisis de hace 20 años, antes

Cuadro 2. Distribución de la variable económica área (en la actividad de cultivo y producción de arroz 'paddy') en cuatro regiones del mundo.

Región	1979-1981		1999-2001	
	Millones de ha	Fracción (%)	Millones de ha	Fracción (%)
América[a]	9.3	6.5	7.6	5.0
África	5.0	3.5	7.6	5.0
Asia	128.1	89.7	137.1	89.6
Europa	0.4	0.3	0.6	0.4

a. Comprende América Latina, el Caribe y los Estados Unidos.

FUENTE: FAOSTAT, 2004.

Cuadro 3. Distribución de la variable económica producción (en la actividad de cultivo y producción de arroz 'paddy') en cuatro regiones del mundo.

Región	1979-1981		1999-2001	
	Millones de TM	Fracción (%)	Millones de TM	Fracción (%)
América[a]	22.5	5.8	32.5	5.4
África	8.5	2.2	17.3	2.9
Asia	357.5	91.6	548.4	91.2
Europa	1.9	0.5	3.2	0.5

a. Comprende América Latina, el Caribe y los Estados Unidos.

FUENTE: FAOSTAT, 2004.

Cuadro 4. Distribución de la variable económica rendimiento (en la actividad de cultivo y producción de arroz 'paddy') en cuatro regiones del mundo.

Región	1979-1981	1999-2001
	Rendimiento (TM/ha)	Rendimiento (TM/ha)
América[a]	2.4	4.2
África	1.7	2.2
Asia	2.8	4.0
Europa	4.8	5.3

a. Comprende América Latina, el Caribe y los Estados Unidos.

FUENTE: FAOSTAT, 2004.

bien, se calculaba una limitación seria en la disponibilidad de tierra adecuada y de agua para el cultivo de este cereal. Puede plantearse, por tanto, la hipótesis de que ese incremento de área en el arroz 'paddy' se dio a expensas del área dedicada a otros cultivos, que fueron sustituidos por el arroz.

Sorprenden, asimismo, los cambios observados en el área sembrada con arroz 'paddy' en el continente africano (por aumento) y en el americano (por disminución).

El número de hectáreas sembradas con arroz 'paddy' en América disminuyó en 1.7 millones de hectáreas; por tanto, su participación en el área total pasó de 6.5% a 5.0%. En África, el cambio ocurrió así: en los 20 años considerados el área sembrada aumentó en 2.6 millones de hectáreas y la participación respecto al total pasó de 3.5% a 5.0%.

Este comportamiento diferente en ambos continentes indica que las fuerzas de mercado están actuando de manera distinta. Hace 20 años se esperaba que el incremento en el área sembrada en América fuera más significativo que el registrado actualmente, puesto que el continente disponía de tierras más aptas y de más agua. Además, las cifras de consumo per cápita indicaban que el arroz era más importante en la dieta de los americanos que en la de los africanos.

Se puede plantear la siguiente hipótesis de trabajo para explicar este fenómeno:

- En ***África,*** la mayor presión sobre el recurso tierra para la producción de arroz se deriva de una mayor demanda de arroz blanco, la cual tiene dos causas: un crecimiento todavía alto de la población y un proceso de urbanización acelerado.
- En ***América***, en cambio, el crecimiento poblacional ha sido más lento, ha habido ajustes en la dieta debidos al mayor ingreso per cápita de sus habitantes, y los procesos de urbanización llegaron ya a su madurez.

Distribución de la producción

La participación de cada continente en la cantidad total de arroz 'paddy' producido a nivel global en el intervalo 1999-2001 no varió sustancialmente con respecto a esa participación en el primer intervalo de referencia, 1979-1981. El 91% de esa producción mundial sigue en Asia, donde se presentó un incremento absoluto de 191 millones de TM. Parte de este incremento se puede explicar por el aumento de área sembrada discutido en la sección anterior.

América y África mantuvieron su porcentaje de participación en el total de la cantidad producida de arroz 'paddy'. El promedio obtenido en el punto 1999-2001 indica que América contribuye con 5.4% y África con 2.9%. Sumados los dos continentes, el incremento absoluto fue de 19 millones de TM. Se puede concluir lo siguiente: en África, el incremento en producción se explica, en parte, por el aumento en el área sembrada; en América, ese incremento se explica, en su totalidad, por un aumento en la productividad, dado que el área ocupada por el cultivo del arroz se redujo.

Es interesante observar que en Europa también se presentó un incremento en la cantidad producida de arroz 'paddy', que se explica, en parte, porque aumentó el área sembrada en ese continente.

La presión positiva (al aumento) que experimenta la producción de arroz 'paddy' en Asia y en África se explica, en gran parte, por las presiones que genera el crecimiento demográfico observado en esos continentes durante los 20 años considerados. En cambio, en América y en Europa los factores que han influido para presionar un aumento de esa producción no son muy claros:

- En ***Europa***, especialmente, los factores que explican los cambios en el consumo (por ejemplo, un aumento en la población o en el nivel de ingreso) deberían haber operado en dirección contraria (hacia un descenso en la producción), ya que el crecimiento de la población de Europa no fue significativo y el aumento del ingreso per cápita que experimentó desincentiva el consumo de granos básicos como el arroz.
- En ***América***, el aumento en la productividad del cultivo permitió, al parecer, mejorar la rentabilidad del productor y disminuir los precios al consumidor; ambos efectos pueden haber incidido en el consumo per cápita.

Distribución del rendimiento

La variable rendimiento, medida en toneladas métricas por hectárea (TM/ha), muestra los cambios más notorios entre los dos puntos de referencia, 1979-1981 y 1999-2001, que se escogieron para este análisis comparativo.

La productividad del sector arrocero, en general, aumentó en forma significativa en los cuatro continentes. El cambio más grande ocurrió en América, donde el rendimiento promedio aumentó en 1.8 TM/ha. Como se indicó anteriormente, este cambio en la productividad explicaba, en un 100%, el aumento en la cantidad de arroz producida. El rendimiento del cultivo aumentó, en gran parte, por la sustitución del sistema de producción en condiciones 'de secano' (tierras poco favorecidas y sin riego) por un sistema de producción con riego, que fue complementado por otros insumos de calidad, como los materiales genéticos mejorados, los fertilizantes y la maquinaria agrícola.

En Asia se observa también un cambio importante en el rendimiento, que aumentó, en promedio, en 1.2 TM/ha. No se puede esperar que hubiera ocurrido un cambio en los sistemas de producción en este continente; se cree, más bien, que se aplicaron de modo más eficiente los métodos de producción convencionales, esta vez apoyados en materiales genéticos mejorados, en fertilización y en mejor manejo del agua.

En África, el rendimiento promedio de arroz 'paddy' registró un incremento absoluto de 0.5 TM/ha en 1999-2001, lo que representa un gran esfuerzo dadas las condiciones desfavorables del suelo y del clima africanos; no obstante, en ese continente el rendimiento del arroz está todavía por debajo de los niveles de rendimiento observados en América y en Asia 20 años atrás. Es muy probable que la mayor parte de este aumento de productividad se explique por la disponibilidad en África de materiales genéticos mejorados que se adaptaron a las condiciones adversas al cultivo del arroz predominantes en ese continente.

Europa mantiene la productividad más alta entre todos y ya superó la barrera de las 5 TM/ha. Este nivel de productividad continúa como el punto de referencia de los productores e investigadores de los otros continentes.

Comercio internacional

El arroz que se vende en los mercados internacionales ha sido siempre una pequeña fracción de la producción total de ese cereal. En otras palabras, el arroz es un producto que se consume dentro de la región o del país en que se produce. Esta característica se denomina 'mercado residual' y se ha mantenido en el tiempo. Por consiguiente, los precios internacionales del arroz tienden a ser muy volátiles, y las pequeñas variaciones en los inventarios tienen efectos inmediatos en los precios internacionales.

Otra característica de este comercio es que, casi en su totalidad, se hace con arroz blanco, puesto que no sería rentable exportar cascarilla y subproductos de bajo valor. Para este análisis se tomó como factor de conversión de arroz 'paddy' a arroz blanco un coeficiente técnico de 0.55, o sea, que 1 TM de arroz 'paddy' equivale a 550 kg de arroz blanco.

El movimiento internacional de exportación de arroz blanco, en su equivalente de arroz 'paddy', como promedio de los años 1979-1981, fue de alrededor de 22 millones de toneladas. Es decir, solamente el 5.5% de la producción total de arroz 'paddy' se movilizó hacia el mercado mundial (Cuadro 5).

Es notorio que este volumen exportado se duplicó en los años 1999-2001 y superó los 44 millones de toneladas de arroz

Cuadro 5. Equivalente en 'paddy' del arroz blanco movilizado en el comercio internacional en dos momentos diferentes del período 1979-2001.

Región	Exportaciones (millones de TM)		Importaciones (millones de TM)		Comercio neto (millones de TM)	
	1979-1981	1999-2001	1979-1981	1999-2001	1979-1981	1999-2001
América[a]	6.1	8.0	1.9	5.5	4.2	2.5
África	0.2	0.8	4.6	10.0	-4.4	-9.2
Asia	14.0	33.2	11.8	22.2	2.2	11.0
Europa	1.7	2.6	3.0	5.5	-1.3	-2.9
Total	22.0	44.6	21.3	43.2		

a. Comprende América Latina, el Caribe y los Estados Unidos.

FUENTE: FAOSTAT, 2004.

'paddy' equivalente, en promedio. De este modo, la participación del arroz transado en el ámbito internacional llegó a 7.3% de la producción mundial de arroz 'paddy'.

En términos de comercio neto se puede afirmar lo siguiente: África es una región importadora neta; además, el 50% del movimiento internacional del arroz blanco es intra-regional, es decir, que el 50% de las operaciones de exportación e importación de arroz se hace entre países de una misma región.

Asia es la región de mayor volumen de comercio internacional de arroz. En los años 1999-2001 aportó el 75% de las exportaciones totales y el 50% de las importaciones totales. El aumento en la producción de arroz blanco en Asia tiene la tendencia a orientarse a mercados que están fuera de la región. En los años 1979-1981 (primer promedio de referencia), Asia tenía un balance positivo de exportaciones de 2.2 millones de TM, y en los años 1999-2001 (segundo promedio de referencia), este balance positivo había llegado a 11 millones de TM.

Por su parte, África y Europa duplicaron las importaciones de arroz blanco entre los años de referencia. Se puede afirmar que, en general, las exportaciones de Asia están dirigidas hacia estas dos regiones. América perdió participación en el mercado de arroz blanco. Aunque la comparación de los promedios de los dos tiempos analizados muestra que aumentaron tanto las importaciones como las exportaciones totales, las exportaciones netas de América decrecieron en un 50%. Ésta es una clara indicación de que el comercio intra-regional de América, o sea, dentro de los países de esa región, se ha fortalecido.

Precios internacionales del arroz blanco

Los precios internacionales del arroz blanco, como los de la mayoría de los cereales, sufrieron una disminución notoria en los 20 años considerados (1979-2001), aunque su volatilidad ha disminuido. Entre 1975 y 1985 se observó una gran variabilidad en los precios internacionales del arroz blanco, con un promedio anual superior a US$450/TM, Thai 5% partido, FOB. Sin embargo, también en ese período y según el nivel de producción mundial, este precio podía descender hasta US$250/TM de la misma referencia.

La explicación de este fenómeno ha sido la siguiente: sólo un pequeño porcentaje de la producción mundial de arroz blanco se comercia internacionalmente y, por tanto, los precios internacionales tienden a ser muy sensibles a la variación de los inventarios.

En ese mismo período, el factor que mejor explicaba las diferencias en la producción mundial de arroz y, por ende, los precios internacionales, era el nivel de precipitación en las zonas productoras, especialmente en las de Asia. Los comerciantes de arroz blanco ('brokers') observaban con mucha atención, durante la época de siembra, las hectáreas sembradas y las fechas de siembra. La falta de lluvias implicaba una disminución en el número de hectáreas sembradas, y un retraso en la fecha de siembra suponía un menor rendimiento físico de grano. Cuando había 2 años continuos de lluvias escasas y tardías, disminuían significativamente los inventarios mundiales y este descenso presionaba los precios al alza. En cambio, cuando las lluvias se presentaban abundantes y en las fechas correctas durante 2 años continuos, aumentaban significativamente los inventarios

mundiales de arroz y este aumento presionaba los precios a la baja.

Sin embargo, el análisis del precio internacional del arroz entre 1996 y 2003 indicaba que el mercado internacional de arroz blanco tendía a la estabilidad. El precio promedio del arroz blanco Thai 5% partido, FOB, para ese período es de US$299 por tonelada. La desviación estándar es únicamente de US$15, y el coeficiente de variación es, entonces, de 5%. Esto significa que el exportador de arroz podía trabajar con un intervalo de precios situado entre US$290 y US$310/TM, con un nivel de confianza del 95% (Cuadro 6).

La estabilidad relativa de los precios internacionales en este período podría explicarse, principalmente, por la disponibilidad de mejores tecnologías, especialmente las variedades mejoradas que se adaptan a situaciones específicas de sequía y de época variable de siembra.

Cuadro 6. Precio internacional del arroz blanco[a] entre 1996 y 2001.

Año	Precio internacional
1996	331
1997	295
1998	285
1999	289
2000	289
2001	297
2002	299
2003	305
Media	299
S.D.	15
C.V.	4.9

a. Referencia: arroz Thai 5%, FOB, US$/TM.

FUENTE: www.foodmarketexchange.com

Una segunda explicación sería que un mayor porcentaje de la producción mundial de arroz se obtiene en áreas que disponen de riego.

Una tercera explicación de esta mayor estabilidad de precios se encontraría en los porcentajes de autosuficiencia de cada una de las regiones consideradas en el análisis. Esto quiere decir que, a pesar de que se observa un aumento en el intercambio de arroz entre las grandes regiones del planeta, la producción regional satisface un porcentaje considerable de la demanda interna.

El arroz y la emergente crisis de alimentos (2007–2008)

Entre los años 2002 y 2008, la estructura del sector arrocero no varió significativamente, pero en los 2 últimos años de ese intervalo (2007-2008) ha emergido la posibilidad de una crisis de alimentos, la cual se ha materializado en un aumento de los precios internacionales para todos los granos y las oleaginosas. Los gobiernos están analizando con preocupación esta nueva tendencia. Los incrementos en los precios de los alimentos agudizan los problemas de acceso y distribución a escala regional e internacional, afectando negativamente los índices de pobreza y desarrollo.

A partir del 2002, el área sembrada con arroz, a nivel mundial, ha permanecido relativamente estable. En el período 2007-2008 se sembraron 153.7 millones de hectáreas. Esta cifra es inferior al valor muy bajo registrado en el período 1999-2000, que fue de 155.3 millones de hectáreas. No se espera que en el futuro próximo el área sembrada con arroz se expanda sustancialmente debido a una relativa escasez de tierras aptas y de agua (USDA, 2007, 2008).

Los rendimientos, a nivel global, también han permanecido estables y cercanos a los 4.2 t/ha de arroz 'paddy'. Tampoco se espera que el rendimiento promedio, a nivel global, aumente significativamente en los próximos años, por dos razones: la mayoría de los materiales genéticos mejorados ya han sido adoptados, y las inversiones en investigación se han reducido (USDA, 2007, 2008).

Una consecuencia del comportamiento de las variables área sembrada y rendimiento promedio es que la producción total de arroz también se ha mantenido estable. La producción total para el período 2007-2008 se ha estimado en 421 millones de toneladas de arroz blanco. La oferta de arroz blanco se ha mantenido estable, mientras la demanda —como un efecto del crecimiento de la población y del ingreso promedio— ha crecido de manera sostenida durante los primeros 6 años del siglo XXI. Se estima que la demanda mundial por alimentos crece a una tasa del 1% anual (FAOSTAT, 2007). Por tanto, se puede deducir que, en los años antes mencionados, la demanda de arroz blanco se incrementó en un 8%.

La anterior hipótesis se confirma con el análisis del comportamiento de los inventarios de arroz blanco a nivel internacional. Para el período 2007-2008, se estima que el nivel de inventarios de arroz blanco llegará a su punto más bajo: 74.1 millones de toneladas. Para comprender la magnitud del cambio de esta variable, hay que recordar que en 1983-1984 los inventarios de arroz blanco llegaron a un nivel 'record' de 150 millones de toneladas (USDA, 2007, 2008).

El anterior análisis sirve para explicar la reciente tendencia al alza de los precios internacionales del arroz. Dado que el porcentaje del arroz que se comercia internacionalmente es sólo un 7% de la producción total, existe una alta correlación negativa entre el tamaño de los inventarios globales y el precio internacional del arroz blanco. La variación de las estimaciones de los inventarios induce variaciones contrarias en el nivel de los precios internacionales.

Los precios internacionales del arroz han aumentado constantemente en los últimos 6 años. En el 2002, la cotización internacional del arroz Thai 5% era de US$299 por tonelada. La cotización de esta misma referencia de arroz a finales del 2007 llegaba a US$316 por tonelada. Ahora bien, estas cotizaciones están dentro del comportamiento histórico del producto. En 1996, la cotización del arroz Thai 5% alcanzó un valor muy alto: US$331 por tonelada (FAOSTAT, 2007).

El próximo escenario económico para el arroz estará influenciado principalmente por variables externas. Las tendencias del área sembrada y del rendimiento del arroz 'paddy' (arroz con cáscara) no señalan un incremento significativo de la oferta de arroz blanco a nivel global. La oferta y la demanda de arroz se verán directamente afectadas por la emergente crisis alimentaria que se ha detectado en el mundo entre el 2007 y el 2008.

Los expertos indican que las variables clave que explican la emergente crisis de alimentos son las siguientes:

1. El incremento en los *precios del petróleo* ha tenido implicaciones directas en los costos de producción de los alimentos, especialmente en el costo de los fertilizantes y en el de los fletes internacionales. La situación del cultivo del arroz es muy similar a la de otros granos y otras oleaginosas, es decir, ha presentado un incremento en los costos domésticos de producción.

2. Como un efecto indirecto del precio del petróleo, la búsqueda de nuevas fuentes de energía ha desarrollado los *biocombustibles*, los cuales compiten con la producción de alimentos en términos de tierra, capital y trabajo. Esta competencia no es directa para el arroz, puesto que las tierras irrigadas son relativamente costosas para la producción de biocombustibles. Hay, en cambio, un efecto indirecto que se expresa como sustitución de consumo, ya que la relativa escasez de otros granos y de oleaginosas induce una mayor demanda de arroz. Por ejemplo, el empleo del maíz en la producción de etanol ha desatado una demanda industrial más alta de arroz en los Estados Unidos (USDA, 2008).
3. El incremento del *ingreso per cápita* en los países en desarrollo, principalmente en China y en India (economías emergentes), ha elevado la demanda doméstica de alimentos. Esta tendencia es muy importante para el arroz, ya que estos países dominan el comercio internacional de este cereal y toda variación en sus excedentes exportables afecta directamente el precio internacional del arroz blanco.
4. La política interna de los países relacionada con la *seguridad alimentaria*. Los principales países exportadores de alimentos han comenzado a limitar sus ventas internacionales estableciendo cuotas o impuestos de exportación, con el fin de garantizar el abastecimiento interno y mantener estables los precios de los alimentos. En el caso del arroz, las decisiones tomadas por algunos países asiáticos, entre ellos China, han restringido la oferta internacional de arroz blanco.
5. El *cambio climático*, cuyos efectos determinan una fuerte agudización de las condiciones extremas y una mayor duración de las épocas de lluvia y de sequía, lo que incide directamente en el área sembrada y en el rendimiento de los cultivos. Estos efectos pueden tener un influjo relativamente moderado en el arroz, en comparación con otros cultivos, porque aquél se produce en condiciones de riego; limitan, sin embargo, sus posibilidades de expansión agrícola.
6. La depreciación generalizada del *dólar* frente a las monedas locales. Esta situación hace que las cotizaciones internacionales del grano sean numéricamente más altas.

Conclusiones

1. Los análisis de tendencia muestran que la estructura del sector arrocero, a nivel mundial, ha permanecido *estable* en las últimas 3 décadas. A pesar de la globalización de la economía, se sigue consumiendo arroz dentro de las mismas regiones geográficas en que se produce; por tanto, sólo se comercializa internacionalmente alrededor del 7% de la producción global.
2. El promedio de *productividad* del arroz ha mantenido, en el mundo, una tasa de crecimiento positiva; esto ha permitido satisfacer el incremento de la demanda, sin necesidad de aumentar significativamente el área de siembra.
3. Aunque existe un equilibrio entre la oferta y la demanda del arroz, a partir del 2003 se presentó una situación de coyuntura, caracterizada por la tendencia al alza en los *precios internacionales*. Esta tendencia ha sido explicada como un fenómeno especulativo originado en la disminución de los inventarios del grano en muchos países. Por su parte, los expertos atribuyen esta disminución de inventarios a factores externos al sector arrocero; por ejemplo, 2 años consecutivos de mal clima, el incremento en el precio del

petróleo que afectó los fletes nacionales e internacionales, y la sustitución por arroz de materias primas agrícolas que se han dirigido a la producción de biocombustibles.

4. Es factible, por tanto, que la estructura de producción del arroz 'paddy' no varíe en los próximos años porque hay estabilidad en el área sembrada y en el rendimiento promedio del grano, a nivel mundial. No obstante, la posibilidad de un *cambio* en el flujo internacional de arroz blanco y en su precio es muy alta. Es posible también que se acentúe la característica del autoconsumo a nivel tanto nacional como regional. Dado ese contexto, las políticas domésticas sobre seguridad alimentaria influirán notablemente el comportamiento de los mercados nacionales de arroz.

Referencias bibliográficas

FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations). FAOSTAT 2004: Anuario estadístico de la FAO 2004. Roma. 346 p. http://faostat.fao.org

FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations). FAOSTAT 2007: Anuario estadístico de la FAO 2007 y hoja de balance de alimentos y cultivos. Roma. http://faostat.fao.org/site/567/default.aspx

USDA (United States Department of Agriculture). 2007, 2008. Rice outlook. Economic Research Service USDA, Washington DC. M2 Presswire.

Capítulo 3

Fondo Latinoamericano para Arroz de Riego (FLAR): Nueva asociación para el sector arrocero

Gonzalo Zorrilla de San Martín

Contenido

	Página
Resumen	26
Abstract	26
Antecedentes	27
Estructura del FLAR	27
Integrantes y recursos	27
Misión	27
Objetivos	29
Proyectos del FLAR	30
Material genético mejorado	30
Transferencia de prácticas de manejo mejoradas	30
Estudios económicos y de mercados	31
FLAR/CIAT como plataforma regional	31
Consideración final	32

Resumen

Se describen brevemente los antecedentes, la estructura, la misión y los objetivos del Fondo Latinoamericano para Arroz de Riego (FLAR). Este Fondo se creó en 1995 por iniciativa de varias instituciones arroceras de la región que se unieron para dar respaldo y continuidad al trabajo de mejoramiento y desarrollo del arroz realizado durante años por el Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT). El FLAR, conformado actualmente por instituciones agrícolas de 15 países de la región, busca servir a sus socios en tres frentes: aportando tecnología para lograr un cultivo competitivo, rentable, eficiente y ambientalmente sostenible; buscando la reducción de los costos unitarios de producción para favorecer indirectamente al consumidor; y contribuyendo al fortalecimiento del sector arrocero de los países de América Latina y el Caribe.

Abstract

Latin American Fund for Irrigated Rice (FLAR): A new alliance for the rice sector
The background, structure, mission, and objectives of the Latin American Fund for Irrigated Rice (FLAR, its Spanish acronym) are briefly described. The Fund, created in 1995, was the

result of an initiative of several Latin American rice institutions that decided to join efforts to endorse and grant continuity to the work in rice improvement and development that had been carried out for many years by the International Center for Tropical Agriculture (CIAT). FLAR, currently formed by agricultural institutions of 15 countries of the region, strives to serve its partners in three areas: development of technology to achieve a competitive, profitable, efficient, and environmentally sustainable crop; reduction of unitary production costs to indirectly favor consumers; and strengthening of the national rice sectors of Latin America and the Caribbean.

Antecedentes

El 16 de enero de 1995 nació el Fondo Latinoamericano para Arroz de Riego (FLAR). La decisión de crearlo provino de varias instituciones arroceras de la región que se unieron para dar respaldo y continuidad al trabajo de mejoramiento y desarrollo del arroz realizado durante años por el Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT). La reducción de fondos públicos para ese trabajo, iniciada a principios de los 90, aceleró esta decisión. En el 2009, las instituciones agrícolas integrantes del FLAR pertenecían a 15 países: Argentina, Bolivia, Brasil, Colombia, Costa Rica, Ecuador, Guatemala, Guyana, Honduras, México, Nicaragua, Panamá, República Dominicana, Uruguay y Venezuela y manejaban una asociación estratégica con el CIAT (Figura 1).

Estructura del FLAR

Integrantes y recursos

Las instituciones que se asocian en el FLAR son heterogéneas y representan distintos sectores arroceros de América Latina. Hay instituciones públicas y paraestatales, gremios de productores, gremios de industriales y empresas privadas productoras de semillas (empresas agroindustriales) (Cuadro 1). La asociación es voluntaria, así como la alianza con el CIAT, y los gobiernos no tienen en este Fondo ninguna representación oficial.

El interés de todos los integrantes del Fondo es procurar el desarrollo del sector arrocero y participar en él activamente, comprometiendo recursos en un proyecto común. El retorno de esa inversión está representado en las herramientas tecnológicas eficaces provistas por el Fondo que les permiten lograr los fines perseguidos.

El FLAR se financia así con aportes de las instituciones socias; la cuota se fija según la producción anual de arroz de los países a los que pertenecen las instituciones. El CIAT hace un aporte especial como socio y desempeña un papel estratégico en el funcionamiento del Fondo, que consiste en un respaldo jurídico y en la oferta de infraestructura de oficinas, laboratorios, galpones, campos experimentales y equipamiento, por cuyo uso el Centro cobra tarifas administrativas y de servicios.

Misión

La misión del FLAR es servir a sus socios en tres frentes: aportando tecnología para lograr un cultivo competitivo, rentable, eficiente y ambientalmente sostenible; buscando la reducción de los costos unitarios de producción para favorecer indirectamente al consumidor; y contribuyendo al fortalecimiento del sector arrocero de los países de América Latina y el Caribe.



Figura 1. Instituciones que componen el FLAR y su distribución en la región latinoamericana (ver Cuadro 1, nota al pie).

Cuadro 1. Identificación del gremio o la actividad en que se encuentran algunas de las instituciones públicas y privadas del sector arrocero latinoamericano que se asocian actualmente en el FLAR.

País	Institución asociada[a]	Gremio o actividad			
		Productor	Molinero	Semillas	Público
Argentina	INTA, COPRA, ADECOAGRO	x	x	x	x
Bolivia	*CIAT*, CONARROZ	x	x		x
Brasil	IRGA	x			x
Colombia	FEDEARROZ	x		x	
Costa Rica	SENUMISA	x	x	x	
Ecuador	INIAP				x
Guatemala	ARROZGUA	x	x		
Guyana	GRDB				x
Honduras	DICTA, AHPRA, ANAMH	x	x	x	x
México	Consejo Mexicano del Arroz	x	x		x
Nicaragua	ANAR	x		x	
Panamá	FEDAGPA, Privados	x	x	x	x
Rep. Dominicana	GENARROZ		x	x	
Uruguay	INIA, ACA	x		x	x
Venezuela	FUNDARROZ	x	x	x	x
	CIAT				x

a. ACA = Asociación de Cultivadores de Arroz; ADECOAGRO = Asociación de empresas agropecuarias de Argentina; AHPRA = Asociación Hondureña de Productores de Arroz; ANAMH = Asociación Nacional de Molineros de Honduras; ANAR = Asociación Nicaragüense de Arroceros; ARROZGUA = Asociación Guatemalteca del Arroz; *CIAT* = Centro de Investigación Agrícola Tropical; CIAT = Centro Internacional de Agricultura Tropical; CONARROZ = Consejo Nacional Arrocero; COPRA = Productora Agropecuaria S.A. Arroz; DICTA = Dirección de Ciencia y Tecnología Agropecuaria; FEDAGPA = Federación de Arroceros y Granos; FEDEARROZ = Federación de Arroceros de Colombia; FUNDARROZ = Fundación Nacional de Arroceros; GENARROZ = Genética del Arroz; GRDB = Guyana Rice Development Board; INIA = Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (Uruguay); INIAP = Instituto Nacional Autónomo de Investigaciones Agropecuarias; INTA = Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria; IRGA = Instituto Riograndense del Arroz; SENUMISA = Semillas del Nuevo Milenio S.A. (Ver también Figura 1.)

Acrónimos de instituciones de la Figura 1 no presentados en este cuadro:
CONAGRO = Consejo Nacional de Agronegocios; FERSAN = Fertilizantes Santo Domingo CxA; FHIA = Fundación Hondureña de Investigación Agrícola; IDIAP = Instituto de Investigación Agropecuaria de Panamá; IMPALE = Importadora Agrícola CxA; MAGAP = Ministerio de Agricultura, Ganadería, Acuacultura y Pesca; SECOSA = Semillas de Coclé S.A. (CxA o C por A = Compañía por Acciones.)

Objetivos

El FLAR busca los siguientes objetivos:

- Incrementar la producción de arroz y reducir los costos unitarios del arroz cultivado en condiciones anaeróbicas; para lograr este objetivo, se apoya en las mejoras genéticas, en el manejo del cultivo, en los procesos de poscosecha y en los demás eslabones de la cadena agroindustrial.
- Crear un foro permanente para América Latina y el Caribe, en el cual se actualicen las necesidades y las oportunidades del sector arrocero de los países participantes.

Proyectos del FLAR

Material genético mejorado

El FLAR promueve el desarrollo de germoplasma mejorado de amplia base genética, que se entrega a los socios en generaciones tempranas de selección (de F_3 a F_6), para que ellos hagan el proceso final de adaptación y selección y el lanzamiento de nuevos cultivares. Este trabajo se desarrolla tanto para la zona intertropical como para la zona templada de América Latina.

En los trópicos se liberaron ya 22 variedades (hasta fines del 2009) y está en proceso de liberación un número importante de cultivares. Estos materiales tienen su origen en el FLAR.

En la zona templada hay un subprograma de mejoramiento que se inició en el 2000 y del cual no hay aún materiales liberados; hay, no obstante, líneas avanzadas en evaluación final en los tres países de la zona (Brasil, Uruguay, Argentina). Se han observado mejoras sustanciales en adaptación y en características específicas en los materiales de últimas generaciones enviados a los socios.

Se desarrollan, además, los siguientes proyectos de investigación junto con el CIAT. El objetivo de estos proyectos es resolver problemas específicos que dificultan la obtención de nuevas variedades:

- En el 2008 se iniciaron dos proyectos con el CIAT y con Fedearroz, un socio colombiano: la selección asistida por marcadores moleculares para encontrar resistencia al virus de la hoja blanca, y la obtención de materiales con características de interés provenientes de cruzamientos interespecíficos entre el arroz común y algunas variedades silvestres.
- En el 2009 se inició un proyecto con el CIAT y con los socios del FLAR pertenecientes a la zona templada de la región: la aplicación de marcadores moleculares a la selección de líneas de arroz tolerantes del frío. Este proyecto es financiado parcialmente por Fontagro, de Argentina, y cuenta con el apoyo del Hokkaido National Research Center, de Japón.

Transferencia de prácticas de manejo mejoradas

- El **primer proyecto** que el FLAR realizó en esta área buscaba reducir la *brecha tecnológica* del cultivo; fue financiado por el Common Fund for Commodities (CFC) y finalizó en julio del 2006. Su objetivo específico era el mejoramiento de la competitividad de los productores de arroz mediante la transferencia a ellos de prácticas mejoradas de manejo del cultivo. Los resultados fueron muy positivos: se han obtenido incrementos desde 1 t/ha hasta más de 3 t/ha en las fincas de los productores que adoptaron las nuevas prácticas agronómicas, y los costos unitarios han sido iguales o menores.
  El FLAR se encuentra actualmente en el proceso de expandir en gran escala, a los países vinculados al Fondo, el método de transferencia empleado y continuar el proyecto del CFC con financiación propia. El objetivo es llegar a miles de productores en cada país y contribuir al fortalecimiento de las instituciones arroceras locales.
- Un **segundo proyecto** se inició en el 2008, también financiado por el CFC. Su objetivo es la implementación de la técnica de *captura de agua* por los pequeños arroceros del sistema de secano de América Central (en Costa Rica, Nicaragua y México), para facilitar su transformación en

productores de arroz con riego de alto rendimiento. La propuesta técnica del proyecto ha sido ampliamente validada en el Cono Sur americano, donde más de 1 millón de hectáreas sembradas con arroz se riegan con agua recogida por los propios arroceros en embalses construidos en sus fincas.

Estas reservas de agua permiten, gracias al manejo que se les da, ensayar la siembra de otros cultivos con riego estratégico, como el fríjol y el maíz. Facilitan, incluso, la producción piscícola dentro del embalse.

Estudios económicos y de mercados

Los estudios sobre la economía del arroz y sobre los mercados del grano han sido también un área de interés permanente para los socios del FLAR. En el 2007 se hizo un estudio, financiado en parte por el CFC, denominado "Cerrando la brecha financiera: Diagnóstico de los mercados arroceros en Argentina, Colombia y Costa Rica". El estudio identificó varias áreas en las que es posible mejorar sustancialmente la eficiencia del sistema de cultivo y. por consiguiente, la competitividad del sector arrocero.

FLAR/CIAT como plataforma regional

En primer lugar, el FLAR es una alianza de inversores que exigen un retorno efectivo a sus aportes. Los productores, por su parte, tienen un papel preponderante en la gestión del Fondo, es decir, se aseguran de que sus objetivos estén directamente vinculados con la demanda real de arroz, o sea, la producción del cereal. El FLAR constituye así una estructura pequeña de inversores y productores cuya acción se apoya en la red de instituciones arroceras que lo conforman.

La agricultura y, en especial, el cultivo del arroz son dos pilares de la economía de los países vinculados al Fondo. El desarrollo agrícola es, por su parte, una herramienta fundamental para neutralizar la pobreza. Ahora bien, dada la creciente apertura comercial de los sectores agrícolas, es necesario mejorar sustancialmente su competitividad sectorial, no sólo para que puedan crecer sino para que subsistan.

En segundo lugar, la alianza establecida entre la red de organizaciones arroceras locales (que conforman el FLAR) y el CIAT equivale a una complementación y crea una sinergia; estos dos efectos contribuyen al logro de un mayor desarrollo científico y tecnológico. El CIAT es un socio estratégico en la investigación que se esfuerza en lograr avances en aspectos básicos ('upstream') como el pre-mejoramiento y en problemas muy complejos y limitantes de la producción de arroz, y que fija metas de investigación de largo plazo. El FLAR aprovecha directamente los resultados y productos de la investigación del CIAT para enfocar sus recursos en la investigación adaptativa, que permite la rápida aplicación de los resultados obtenidos a la realidad de la producción local. De este modo, el FLAR desarrolla variedades ajustadas a las necesidades de las instituciones asociadas en cada país y asegura, a través de ellas y en las respectivas localidades, una pronta adopción de los nuevos materiales de arroz por los agricultores.

El FLAR, a su vez, constituye para el CIAT una herramienta eficaz para que el Centro extienda su acción de mejoramiento y desarrollo del arroz con riego en América Latina. Esa acción es muy efectiva gracias al nexo estrecho que el CIAT puede establecer con las instituciones asociadas al Fondo y, por ende, con los agricultores y técnicos que las componen.

La alianza FLAR/CIAT se fortaleció recientemente con la creación de un fondo para investigación en arroz de ambas entidades, el FOIN, que funciona del modo siguiente: las instituciones asociadas en el FLAR harán aportes específicos según el volumen de las ventas de semilla certificada de las variedades de origen FLAR; estos recursos se invertirán en actividades de investigación y desarrollo de interés común cuya realización corresponde al CIAT. Dadas las anteriores consideraciones, se puede afirmar que la alianza FLAR/CIAT constituye una plataforma regional para el progreso del arroz con riego en América Latina.

Consideración final

Los programas o sistemas públicos de investigación y extensión están en crisis en casi todos los países de América Latina, y se han convertido en una limitante seria de las acciones con que los centros de investigación adscritos al Grupo Consultivo para la Investigación Agrícola Internacional (CGIAR) se esfuerzan por colaborar en el desarrollo agropecuario. Este desarrollo es la principal palanca para remover la pobreza, que es hoy un grave obstáculo en el progreso de los pueblos. En este escenario, el modelo del FLAR es muy útil porque puede aplicarse a diversos cultivos y actividades agrícolas y en regiones y continentes distintos, y es un mecanismo acertado de desarrollo agrícola porque incorpora a este trabajo a los verdaderos destinatarios del avance tecnológico de la agricultura.

PARTE A

Eco-Fisiología de la Planta de Arroz

Capítulo 4

Origen, taxonomía, anatomía y morfología de la planta de arroz (*Oryza sativa* L.)

Víctor Degiovanni
Luis Eduardo Berrío
Roger Enrique Charry

Contenido

	Página
Resumen	35
Abstract	36
Introducción	36
El cultivo del arroz en la historia	37
Arroz asiático	37
Arroz africano	38
Taxonomía del arroz	38
Tribu Oryzae	39
Género *Oryza*	40
Anatomía de la planta de arroz	43
Anatomía de las raíces	43
Anatomía de los entrenudos	44
Anatomía de las hojas	46
Anatomía de la panícula	48
Anatomía de la semilla	49
Morfología de la planta de arroz	50
Órganos vegetativos	50
Órganos reproductores	53
Referencias bibliográficas	58

Resumen

Se presenta información sobre el origen, el desarrollo, la taxonomía, la anatomía y la morfología del arroz. Partiendo de la literatura, se revisan y discuten aspectos históricos del origen de *Oryza sativa*. Aunque el cultivo del arroz data de tiempos prehistóricos, existen discrepancias entre especialistas en cuanto al origen y relación evolucionaria entre el género *Oryza* y otros géneros de la familia Gramíneas. Se explica en detalle la taxonomía de la especie, haciendo énfasis en la tribu Oryzae y sus dos subtribus (las oryzíneas y las

zizaníneas), en el género *Oryza* y sus diferentes secciones, y en los diferentes tipos de *O. sativa* (índica, japónica y javánica o bulú). Se describen e ilustran la anatomía de la raíz, de los entrenudos, de las hojas, de la panícula y de la semilla del arroz. Respecto a la morfología de esta gramínea anual, se describen e ilustran la forma y la estructura de sus principales órganos, que se agrupan en órganos vegetativos (raíz, tallo y hojas) y órganos reproductores (panícula, raquis, espiguilla, flor y semilla). Se destacan ciertas características de la planta, como sus tallos cilíndricos y huecos, constituidos por nudos y entrenudos; sus hojas de lámina plana y vainas largas; y su inflorescencia en panícula. La altura de la planta puede variar desde 0.4 m (variedades enanas) hasta 7.0 m (variedades flotantes). Finalmente se explica en detalle la germinación de la semilla de arroz.

Abstract

Origin, taxonomy, anatomy, and morphology of the rice plant (*Oryza sativa* L.)
Information is presented on the origin, development, taxonomy, anatomy, and morphology of rice. Historic aspects of the origin of *Oryza sativa* are examined and discussed based on an extensive literature review. Although rice cultivation dates back to prehistoric times, there are discrepancies regarding the origin of rice and the relationship between the genus *Oryza* and other grasses. The taxonomy of the species is detailed, focusing on the Oryzae tribe and its two subtribes (Oryzinae and Zizaniinae), the *Oryza* genus and its different sections, and the different types of *O. sativa* (indica, japonica, and javanica or bulu). The anatomy of the roots, internodes, leaves, panicle, and seed of the rice plant is also described and illustrated. Regarding the morphology of this annual grass, the form and structure of its main organs, which are grouped into vegetative organs (root, culm, leaves) and reproductive organs (panicle, rachis, spikelet, flower, seed), are described and illustrated. Distinctive characteristics are its hollow cylindrical culms formed by nodes and internodes, its flat leaf blades joined to the leaf sheath, an inflorescence called a panicle, and its plant height, which ranges from 0.4 m (dwarf varieties) to 7.0 m (floating varieties). The process of rice seed germination is also explained in detail.

Introducción

El arroz es una entidad vegetal de alta variabilidad genética, que está representada por muchas especies y miles de formas cultivadas. Todas son el resultado de los procesos naturales de evolución y de los continuos progresos que el hombre ha logrado en un material vegetal original sometiéndolo a múltiples cruces artificiales y a procesos biotecnológicos.

Esta gran variabilidad de formas hace muy difícil la definición de las características morfológicas generales de esta especie; no es posible, por tanto, uniformar ese conocimiento ni entre los científicos encargados de diseñar y obtener nuevos tipos mejorados ni entre el personal que realiza las labores de producción del grano.

La especie *Oryza sativa* L., como tal, no suscita controversia, al parecer, respecto a su origen asiático (a diferencia de su ancestro silvestre); sin embargo, no hay todavía un acuerdo sobre un lugar más preciso de su origen, que sería el oriente de la antigua península de Indochina (hoy ocupada por Vietnam, Camboya y Laos) o el valle del río Yang–Tse Kiang, en China.

Las especies del género *Oryza* son numerosas y los taxónomos las han clasificado de diversa manera. Baillon (1894) dividió el género *Oryza* en cuatro secciones: *Euoryza*, *Padia*, *Potamophila* y *Malbrunia*. En 1931, R.Y. Roschevicz (citado por González, 1985) publicó los resultados de sus investigaciones sobre el género; basándose en las características de la espiga y de las glumas, abrió en él las cuatro secciones siguientes:

- La sección *sativa* Roschev, que abarca las especies cultivadas y la mayoría de las especies silvestres; unas y otras son, en su mayoría, anuales.
- La sección *granulata* Roschev, que se encuentra solamente en el sudeste de Asia y todas sus especies son perennes.
- La sección *coarctata* Roschev, que está distribuida en diferentes partes del mundo y cuyas especies son, casi todas, perennes.
- La sección *rhynchoryza* Roschev, cuyas especies tienen un tipo de planta diferente al de las especies de otras secciones.

En 1963, el Simposio Internacional sobre Genética y Citogenética del Arroz, reunido en Los Baños, Filipinas, admitió 19 especies de esa clasificación, que estaban claramente diferenciadas, y 6 cuya clasificación es aún incierta. Según Zhukovsky (1971) se aceptan 28 especies en el género *Oryza*, casi todas descritas; no obstante, Vaughan (1994) describe 22.

Dos especies de arroz se cultivan actualmente: *Oryza sativa* L., que es de origen asiático, y *Oryza glaberrima* Steud., de origen africano. La expansión del cultivo se debe a la primera especie; la segunda sólo se encuentra en el oeste de África (Angladette, 1969).

El cultivo del arroz en la historia

Es difícil establecer con exactitud la época en que se inició el cultivo del arroz. La literatura china menciona el arroz 3000 años antes de Cristo (AC), cuando se consideraba su siembra como una ceremonia religiosa importante, reservada al emperador. El primer cultivo de arroz se le atribuye al emperador Shen-Nung, quien ha sido considerado el padre de la agricultura y la medicina de su pueblo. Otros textos mencionan el arroz como el más importante de cinco cultivos en la alimentación de los chinos. En el valle del Yang–Tse Kiang se han encontrado restos de arroz que datan de 3000 a 4000 años AC (Angladette, 1969).

Arroz asiático

El arroz pudo haberse cultivado en otras épocas y pudo originarse en algún sitio diferente de China. Varios autores aceptan que *Oryza sativa* L. procede del sudeste de Asia, de una región cercana a la parte sur de India, o sea, de la antigua Cochinchina (región meridional de la península de Indochina), donde las condiciones ambientales son favorables para este cultivo y hay gran cantidad de especies silvestres del género *Oryza.* Roschevicz, citado por Angladette, cree que el lugar de origen de *Oryza sativa* L. es el sudeste asiático, principalmente cerca de India o de la península de Indochina (ocupada actualmente por Vietnam, Camboya y Laos), donde *Oryza fatua* Köning, un antepasado directo de *Oryza sativa*, se encuentra en estado silvestre (González, 1985).

De Candolle, en sus escritos sobre el origen de las plantas cultivadas, y Watt, en su diccionario de los productos económicos de la India, opinan también que *Oryza sativa* L. fue cultivada originalmente en India, más exactamente al sur de este subcontinente, donde hay

condiciones muy favorables para su cultivo. La literatura hindú (cuyas obras datan de 1300 y 1000 AC) describe ya con precisión algunas prácticas de cultivo, como el trasplante, y hace una clasificación del arroz según sus características agronómicas y alimenticias.

Se admite que el arroz se propagó desde el sudeste asiático y el sur de India hasta China, en una época aún no establecida pero que se calcula transcurrió más de 3000 años AC. Este cereal fue llevado de China a Corea y de este país, o desde China, fue introducido en Japón, al parecer en el siglo I AC (Cheaney, 1974). Roschevicz señala que ha sido quizás en Japón donde el cultivo del arroz se expandió más hacia el norte, ya que llegó a la región de Hokkaido, la isla más septentrional del archipiélago japonés. Antes del siglo XI de nuestra era ya existía el primer ideograma representativo del arroz.

Se cree que, desde China, el arroz llegó a Filipinas, donde fue cultivado 2000 años AC y aun antes. Se cree también que pasó del sur de India a Indonesia y de allí entró en Ceilán (hoy Sri Lanka). Más tarde, el arroz llegó a Asia occidental y a la cuenca del Mediterráneo, quizás bajo el imperio persa, y fue sembrado en Mesopotamia, a orillas del río Eufrates, y en Siria. Alejandro Magno invadió Persia y una porción de India en 320 AC y los griegos lo introdujeron luego en sus campos. Es posible que lo hayan conocido antes de la invasión de Alejandro Magno, por los contactos que habían hecho con viajeros árabes que visitaban la costa occidental de la India (González, 1985).

Los árabes fueron muy eficientes en expandir el cultivo del arroz. En el siglo IV AC lo introdujeron en Egipto, y entre el siglo VIII y el X llevaron el arroz asiático de grano largo a África oriental, al noreste de Madagascar, luego a Marruecos y poco después a España cuando invadieron la península ibérica (Angladette, 1969). Gracias a las colonias portuguesas, holandesas y españolas de África, las variedades asiáticas de arroz llegaron al continente africano (González, 1985).

¿De dónde vino y cuándo llegó el arroz al hemisferio occidental? No hay aún una respuesta exacta. Algunos autores afirman que Cristóbal Colón, en su segundo viaje en 1493, trajo semillas de arroz al Nuevo Mundo, pero no germinaron (Cheaney, 1974). El historiador Simón, citado por Jennings (1961), afirma que en el valle del río Magdalena, en Colombia, hubo siembras de arroz en 1580 (González, 1985).

A finales del siglo XVII, los holandeses y los portugueses introdujeron el arroz en América del Norte, más exactamente en la colonia de Carolina. Un barco procedente de Madagascar fue dañado por una tempestad y tocó puerto en Charlestón; allí dejó 40 libras de semilla en 1685 (Cheaney, 1974).

Arroz africano

La otra especie cultivada, *Oryza glaberrima* Steud., es originaria del oeste de África, posiblemente del delta central del Río Níger. Se dispersó solamente alrededor de su lugar de origen (Angladette, 1969). La Figura 1 muestra las posibles rutas colonizadoras del cultivo del arroz (Cheaney, 1974; González, 1985).

Taxonomía del arroz

El arroz pertenece a las Fanerógamas, tipo Espermatofitas, subtipo Angiospermas, clase Monocotiledóneas, orden Glumifloras, familia Gramíneas,



Figura 1. Movimiento del arroz en el mundo desde su punto de origen (Cheaney, 1974; González, 1985).

subfamilia Panicoideas, tribu Oryzae, subtribu oryzíneas, género *Oryza* (Angladette, 1969; González, 1985; Porter, 1959).

Tribu Oryzae

Se caracteriza por las espiguillas en panícula, unas veces uniflorales y con frecuencia carentes de glumas, o bien con dos o tres flores, de las cuales las dos inferiores poseen una sola pieza, la glumela, y la terminal es la única fértil. Los estambres son generalmente seis, aunque a veces son menos y en ciertos casos se reducen a uno. Según Prodoehl y Bewo, citados por Angladette (1969), esta tribu comprende dos subtribus: las oryzíneas y las zizanínеas, a las cuales pertenecen cuatro géneros diferenciados por sus características sexuales y por la presencia o ausencia de glumas.[1]

1. Adaptado de Angladette (1969) y González (1985).

Subtribu orizíneas
Tiene espiguillas bisexuales. Comprende tres géneros: *Oryza*, *Leercia* e *Hygroryza*.

- El género *Oryza* posee glumas, generalmente rudimentarias pero bien visibles; tiene espiguillas comprimidas lateralmente, aristadas o múticas. La cariópside está estrechamente encerrada por las glumas endurecidas.
- El género *Leercia* no posee glumas; sus espiguillas descansan en pedúnculos muy cortos, son múticas, muy comprimidas lateralmente, y bastante parecidas a las del género *Oryza,* pero más pequeñas (de 3 a 4 mm).
- El género *Hygroryza* no posee glumas; las espiguillas descansan en pedúnculos de longitud variable, son solitarias o poco numerosas, lanceoladas, y tienen glumelas papiráceas.

Subtribu zizanínеas
Comprende el género *Zyzania*, que posee espiguillas unisexuales e inflorescencia

en panícula estrecha con numerosas ramas suberectas; sin glumas pero con glumelas membranosas, estrechas y oblongas, la inferior de las cuales se prolonga por una larga arista de 8 a 10 mm en la espiguilla macho y de 15 a 20 mm en las espiguillas hembra.

Género *Oryza*

Las distintas especies del género *Oryza*, a excepción de la especie *O. sativa* L., no llamaron la atención de los botánicos hasta hace 2 siglos. Estas especies son numerosas y han sido clasificadas de diversa manera por los taxónomos investigadores.

Secciones

En la Introducción de este capítulo se presentaron las secciones en que fue dividido el género. De las 22 especies que actualmente pertenecen al género *Oryza*, la mayoría se presentan en el Cuadro 1 (Vaughan, 1994). Es posible que se descubran especies nuevas de este género y que los estudios de morfología, anatomía y citogenética permitan su reagrupación o señalen la conveniencia de desmembrar las seis especies cuya validez, según el simposio de 1963, es aún incierta.

En las especies del género *Oryza*, el número base de cromosomas es 12; a partir de este número, y por transploidización, se habría formado una serie de poliploides. Por tal razón, las especies del género *Oryza,* cuyo número cromosómico sea 24, pueden considerarse tetraploides, y aquéllas en que ese número sea 48 serían octoploides.

Tipos de *O. sativa*

En la especie *Oryza sativa* L. se consideran tres grupos o tipos de arroz: índica, japónica y javánica o bulú. Su origen estaría en la selección hecha, bajo diferentes ambientes, del arroz silvestre en los procesos de domesticación (Chandler, 1979). El tipo índica y el tipo japónica fueron considerados subespecies de *Oryza sativa,* pero actualmente son razas ecogeográficas.

- Las variedades tradicionales de ***tipo índica*** que se cultivan en los trópicos tienen las siguientes características: mayor altura que otras variedades, macollamiento denso, hojas largas e inclinadas de color verde pálido, y grano de mediano a largo. Estos granos tienen un contenido de amilosa entre medio y alto que les da un aspecto seco y blando, y los hace poco aptos para desintegrarse en la cocción. Los trabajos de mejoramiento han producido variedades de arroz de tipo índica que tienen estatura corta, macollamiento abundante y respuesta al nitrógeno, y que dan un rendimiento tan alto como las de tipo japónica.
- Las variedades de ***tipo japónica*** tienen hojas erectas de color verde intenso y una capacidad de macollamiento menor que la de las variedades de tipo índica; tienen mayor respuesta al nitrógeno (medida en rendimiento) que éstas, son insensibles al fotoperíodo y toleran las bajas temperaturas. Sus granos son cortos y anchos y su contenido de amilosa, que es bajo, los hace pegajosos y con tendencia a desintegrarse en la cocción.
- Las variedades de tipo ***javánica*** o ***bulú*** son morfológicamente similares a las del tipo japónica, pero sus hojas son más anchas y pubescentes, emiten pocas macollas, y la planta es fuerte y rígida. Estas variedades son insensibles al fotoperíodo y sus granos son aristados.

Cuadro 1. Especies del género *Oryza* y sus principales sinónimos, números cromosómicos, grupos genómicos y usos potenciales.

Sección[a]	Especies del complejo	Otros nombres que se hallan en la literatura	Número cromosómico	Grupo genómico	Caracteres útiles o potencialmente útiles
Oryza					
	Complejo de *O. sativa*				
	O. sativa L.		24	AA	Cultigen
	O. nivara Sharma et Shastry	*O. rufipogon* (hábito anual)	24	AA	Resistencia parcial a la pudrición del tallo (Rutger et al., 1987)
	O. rufipogon Griff.[b]	*O. perennis*, *O. rufipogon* (hábito perenne)	24	AA	Tolerancia de la mancha de la vaina (Bastawesi, 1985)
	O. glaberrima Steud.		24	AA	Cultigen
	O. barthii A. Chev.	*O. breviligulata*	24	AA	Resistancia al saltahojas verde (Heinrichs et al., 1985)
	O. longistaminata Chev. et Roehr.	*O. barthii*	24	AA	Resistancia al añublo bacteriano (Khush et al., 1990)
	O. meridionalis Ng		24	AA	Evasión de la sequía
	Complejo de *O. officinalis*	También llamado complejo o grupo de *O. latifolia*			
	O. officinalis Wall. ex Watt.[c]	*O. minuta*	24	CC	Resistancia a los trips (Nugaliyadde y Heinrichs, 1984)
	O. minuta Presl. et Presl.	*O. officinalis*	48	BBCC	Resistencia al añublo de la vaina (IRRI, 1991b)
	O. rhizomatis Vaughan		24	CC	Rizomatosa
	O. eichingeri Peter		24	CC	No se infecta con el moteado amarillo (Ou, 1985)
	O. punctata Kotschy ex Steud.	*O. schweinfurthiana*, para la forma tetraploide	24, 48	BB, BBCC	Resistencia al saltahojas en zigzag (Heinrichs et al., 1985)
	O. latifolia Desv.		48	CCDD	Resistencia a tres biotipos del saltahojas marrón (Heinrichs et al., 1985)
	O. alta Swallen		48	CCDD	Resistencia al barrenador del arroz (IRRI, 1991b)
	O. grandiglumis (Doell) Prod.		48	CCDD	Tipo de planta grande
	O. australiensis Domin		24	EE	Rizomatosa

(Continúa)

Cuadro 1. (Continuación.)

Sección[a]	Especies del complejo	Otros nombres que se hallan en la literatura	Número cromosómico	Grupo genómico	Caracteres útiles o potencialmente útiles
***Ridleyanae* Tateoka**[d]					
	O. brachyantha Chev. et Roehr.		24	FF	Resistencia al gusano del cogollo (Heinrichs et al., 1985)
	O. schlechteri Pilger		48	Desconocido	Estolonífera
	Complejo de *O. ridleyi*				
	O. ridleyi Hook. f.		48	Desconocido	Resistencia al barrenador del tallo (Van y Guan, 1959)
	O. longiglumis Jansen		48	Desconocido	Tolerancia del sombreado
***Granulata* Roschev.**	Complejo *O. meyeriana*				
	O. meyeriana (Zoll. et Mor. ex Steud.) Baill.[e]		24	Desconocido	Tolerancia del sombreado
	O. granulata Nees et Arn. ex Watt.		24	Desconocido	Tolerancia del sombreado

a. Se han empleado los nombres de las secciones según el Código Internacional de Nomenclatura Botánica (Lanjouw, 1966). La asignación de las especies a las secciones se hizo de conformidad con los puntos de vista de Roschevicz (1931) y Tateoka (1964).
b. Algunas de las poblaciones de arroz silvestre de genoma AA de América Latina se distinguen bastante (Tateoka, 1962b; Oka, 1988), lo que sugiere que se han aislado mucho tiempo de las poblaciones asiáticas de *O. rufipogon*. Se ha usado el nombre *O. glumaepatula* Steud. para las poblaciones latinoamericanas de *O. rufipogon*. No obstante, las observaciones de varios autores (por ejemplo, Tateoka, 1962b) sugieren la existencia de formas intermedias entre las formas que se distinguen por sus espiguillas grandes y las poblaciones que no son distinguibles de *O. rufipogon*. Puesto que no se han encontrado caracteres buenos y decisivos que puedan diferenciar a *O. rufipogon* de *O. glumaepatula*, no se ha utilizado este último nombre en este cuadro.
c. La especie *malampuzhaensis* Krishnaswamy et Chandrasakharan está restringida a unas pocas poblaciones de Kerala y de lugares adyacentes de Tamil Nadu, en India. Es posible hallarla cerca de poblaciones de *O. officinalis*. Algunos autores consideran que *O. malampuzhaensis* es sólo una raza cromosómica.
d. La sección *Ridleyanae* se llamó anteriormente sección *Coarctata* Roschev. hasta que *Oryza coarctata* se reclasificó en *Porteresia*, un género aparte.
e. La especie *O. indandamanica* Ellis se ha reportado solamente en una población de las Islas Andamán, en la India. Partiendo de la información disponible actualmente (por ejemplo, en Khush y Jena, 1989), esta diminuta variante del complejo *O. meyeriana* merece ser considerada solamente como entidad intraespecífica. No se dan características claras y decisivas en la descripción original para poder diferenciarla tanto de *O. granulata* como de *O. meyeriana*. En este cuadro el taxón es una variante de *O. granulata*.

Traducido de Vaughan, 1994.

Anatomía de la planta de arroz

Anatomía de las raíces

La anatomía de las raíces del arroz es similar a la de las plantas acuáticas, aunque difiere de ellas en los pelos absorbentes que posee en abundancia. Consta de seis diferentes estructuras (Figura 2), que se explican enseguida:

- **Epidermis.** Es la capa de células más externa, y en ella se inician los pelos absorbentes, que tienen vida corta y desaparecen.
- **Exodermis.** Es la estructura más exterior de la corteza, y consta de una o varias capas de células. Actúa como tejido de protección y sus células contienen corcho en las paredes.
- **Esclerénquima.** Esta estructura se encuentra debajo de la exodermis; su función es proteger la raíz cuando desaparezcan las dos capas anteriores. Está formada por capas de células cuyas paredes gruesas impiden el paso del agua hacia dentro o hacia fuera de la raíz.

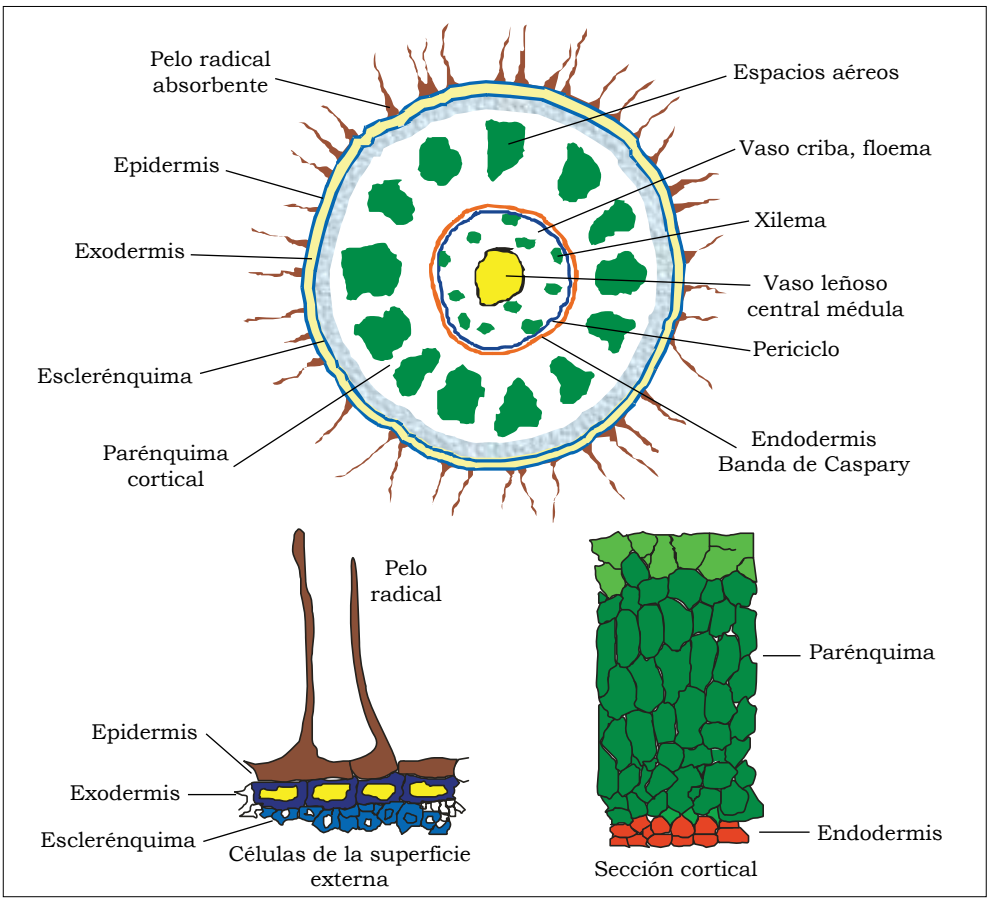


Figura 2. Corte transversal de una raíz de arroz.

FUENTES: Vasconcellos (1963); González (1985); Charry (2007).

- **Parénquima cortical.** Está constituido por células cuyo protoplasma vivo y nucleado les permite intervenir en las actividades metabólicas de la planta. Esas células varían en tamaño, en forma y en el espesor de sus paredes. El tejido del parénquima tiene espacios intercelulares grandes.

  La parte central de este tejido cortical ocupa el mayor volumen; se compone de varias capas y forma una unidad compacta que, cuando la raíz es joven, contiene agua; en cuanto crece la planta, las capas pierden agua, se separan y crean espacios aéreos o cámaras de aire, típicas de las plantas que se desarrollan en suelos inundados. Estas cámaras tienen una función importante en la respiración de las raíces (función relacionada con el término 'parénquima').

- **Cilindro vascular.** Esta estructura consta de tejidos vasculares que conectan el tallo con las raíces, y se organizan junto con otros componentes:[2]

  - ***Endodermis:*** Es un conjunto de células alargadas que forman la banda de Caspary, cuyas paredes se vuelven más gruesas en las raíces ya desarrolladas.
  - ***Periciclo*** o ***parénquima medular:*** Es un tejido delgado que forma la estela que es un sistema formado por los tejidos vasculares en el eje (raíz y tallo) de las plantas. El periciclo es la parte externa del cilindro vascular localizada entre él y la endodermis.
  - ***Floema:*** Es el principal tejido conductor de nutrientes elaborados por las plantas vasculares. Está compuesto por elementos llamados *criba*, que son series longitudinales de células denominadas 'miembros de tubos cribosos', que se conectan entre sí por medio de placas cribosas simples o compuestas, células de parénquima, células de fibra y células escleroideas. Estas últimas pueden tener cloroplastos y leucoplastos, pero no forman almidón; se especializan en realizar las funciones nucleares de los elementos cribosos y mueren cuando éstos dejan de ser funcionales.
  - ***Xilema:*** Es el tejido conductor de agua; sus elementos tienen forma de tráquea.
  - ***Médula:*** Conjunto de células que se desarrollan cuando aún no se ha formado el xilema.

- **Cofia.** Masa de células en forma de dedal, que cubre el meristemo apical de la raíz; sirve de capa protectora de ese meristemo y ayuda a la raíz a penetrar en el suelo.

Anatomía de los entrenudos

En un entrenudo se encuentran las siguientes estructuras (Figura 3,A):

- **Epidermis.** Esta estructura es una capa de células de paredes gruesas que cumplen las siguientes funciones: restricción de la transpiración, protección mecánica, intercambio gaseoso a través de los estomas, y almacenamiento de agua y de productos del metabolismo. Sus células son de diverso tipo (Figura 3,B):

  - ***Células guarda:*** Abren o cierran la apertura de los estomas.
  - ***Tricomas:*** Son crecimientos de las células de la epidermis hacia afuera, como una vellosidad; varían en tamaño.

2. Adaptado de Chang (1964); Chang y Loresto [1968]; González (1985).

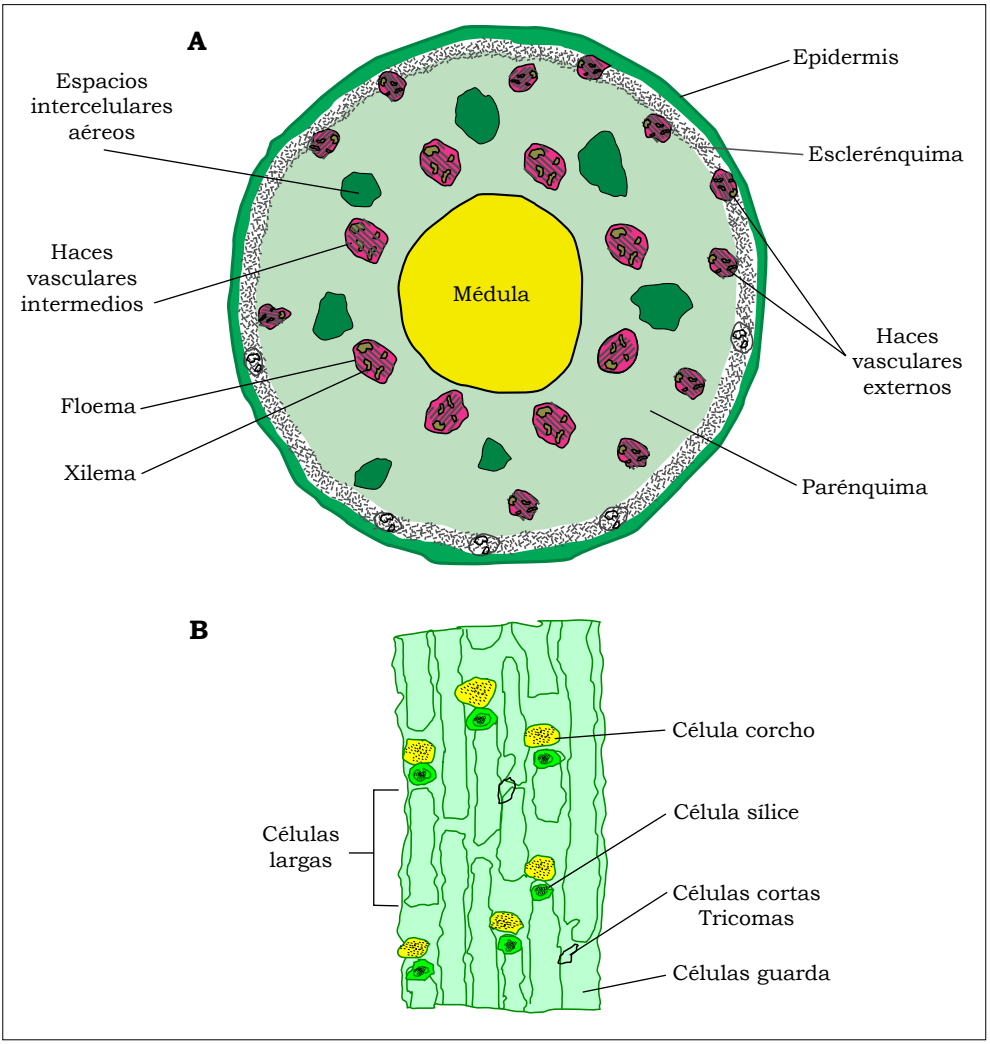


Figura 3. (A) Corte transversal de un entrenudo maduro y (B) de su epidermis. (Adaptada de González, 1985.)

- ***Células cortas:*** Son células vivas de dos clases: *células de sílice*, que pierden su protoplasma al madurar y se van llenando de cristales de sílice (SiO_2, dióxido de silicio), y *células de corcho*, que suberizan sus paredes y se hacen así impermeables al agua.
- ***Células largas:*** Son células onduladas, de tipo epidérmico, de paredes delgadas.

- **Esclerénquima.** Es un conjunto de células de paredes delgadas, generalmente lignificadas, que sirven para darle resistencia a la planta. Estas células forman varias capas que protegen la planta contra fuerzas que intenten doblarla, oprimirla con un peso o someterla a presión. Están interconectadas y forman bandas delgadas que se extienden hacia la panícula.

- **Parénquima.** Son células vivas, de paredes delgadas en forma de poliedro; intervienen en las actividades metabólicas de la planta.
- **Espacios intercelulares lisígenos.** Están en el parénquima y dan lugar a un tejido lisígeno formado por células de forma estrellada o lobuladas; dejan espacios intercelulares muy grandes llamados lagunas o cámaras que, en los nudos más bajos, conectan los entrenudos adyacentes y crean pasos de aire, los cuales llegan a las raíces desde la parte del tallo que crece fuera de la tierra. Este tejido se llama también aerénquima.
- **Haces vasculares.** Están rodeados por una vaina o lámina de células de esclerénquima. Son de cuatro tipos:
  - ***Floema:*** Consta de tres elementos: los *vasos cribados*, que son células longitudinales aptas para conducir materiales alimenticios; las *células de parénquima*, que sirven para almacenar o traslocar alimentos; y las fibras que dan soporte a las anteriores.
  - ***Xilema:*** Consta de elementos en forma de tráquea (ver antes) que sirven para conducir agua.
  - ***Fibras de parénquima:*** Son células que sirven de soporte y también para almacenar y traslocar alimentos.
  - ***Fibras de esclerénquima:*** Son células alargadas, ahusadas, de paredes delgadas, que tienen una pared secundaria con lignina (a veces sin ella) para brindar soporte al haz vascular.
- **Meristemo intercalar.** Es un tejido derivado del meristemo apical que, localizado en la axila que forma el nudo con la hoja, conserva su función meristemática a cierta distancia del meristemo apical.
- **Médula.** Es el tejido central del entrenudo que se ahueca o desaparece, creando un canal cuando el entrenudo madura.

Anatomía de las hojas

Hay que diferenciar dos partes en la hoja del arroz: la ***vaina*** y la ***lámina***. La vaina se caracteriza por las lagunas aeríferas que tiene en el mesófilo, cuya importancia aumenta a mayor altitud del sitio de cultivo. Tiene haces vasculares que se disponen en dos círculos concéntricos, uno de haces pequeños exteriores y otro de haces grandes interiores que alternan con los primeros.

Estructuras de la vaina

Un corte transversal de la vaina revela cuatro estructuras:

- **Epidermis.** Protege los tejidos de una pérdida excesiva de agua y da protección mecánica a la hoja. Sus células exteriores, que contienen celulosa, conforman la cutícula. Su diferencia principal con la epidermis de la lámina es que carece de células motrices (Figura 4,A). Está constituida por dos tipos de células epidérmicas: las células largas y las células cortas:
  - ***Células largas:*** Son de forma larga y ondulada y se caracterizan por presentar cutícula en la pared externa.
  - ***Células cortas:*** Son las células de sílice, los tricomas y las células guarda que rodean y encierran los estomas.
- **Fibras.** Es un conjunto de células en forma de U (o en forma de barra), adyacentes a los haces vasculares, cerca de la epidermis abaxial de la vaina; se extienden en bandas irregulares.

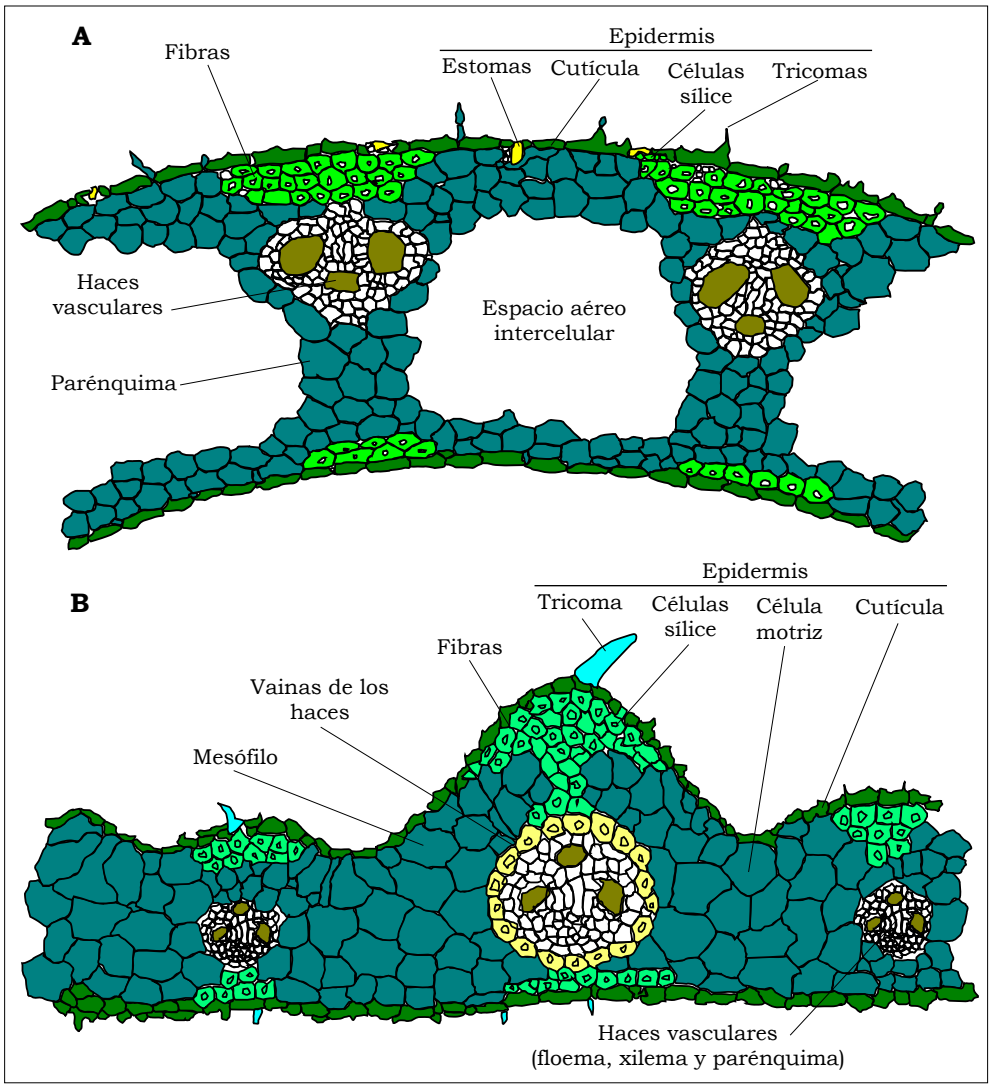


Figura 4. (A) Corte transversal de la vaina y (B) de la lámina de la hoja de arroz.

- **Parénquima.** Su parte ***exterior*** (parénquima externo) consta de tres o cuatro capas de células que contienen cloroplastos y que están conectadas con los haces vasculares. Su parte ***interior*** (parénquima interno) consta de células sin cloroplastos y con grandes espacios intercelulares, que se van convirtiendo en lagunas aeríferas; con frecuencia se encuentran gránulos de almidón en estas células.
- **Haces vasculares.** Son de dos tipos: floema y xilema.
  - ***Floema:*** Es el tejido conductor encargado del transporte de nutrientes orgánicos, principalmente azúcares.
  - ***Xilema:*** Es un tejido leñoso cuya función es el transporte de la

savia (bruta) desde la raíz hacia la parte aérea de la planta.
- ***Parénquima del floema:*** Es un tejido vegetal constituido por células de forma esférica, que se considera fundamental en la planta. Participa en la carga y descarga de azúcares, almacena almidón, grasas y cristales.
- ***Vaina de los haces:*** Es una capa de células que rodea y encierra un grupo de vasos del floema y xilema; consta de tejido de parénquima o de esclerénquima.

Estructuras de la lámina
En el corte transversal de una lámina foliar se aprecian cinco estructuras:

- **Epidermis.** Está constituida por varios tipos de células: las células ***largas***; las células ***cortas***, que son células de sílice, células de corcho, tricomas o pelos, papilas y células guarda de los estomas; y las células ***motrices***, que son células epidermales agrandadas y ordenadas en surcos longitudinales de células similares, cuya función es enrollar y desenrollar la lámina foliar (Figura 4,B).
  La función de la epidermis laminar es doble: protege los demás tejidos de la hoja contra la pérdida excesiva de agua, y da protección mecánica a la hoja mediante la cutícula, cuyas células contienen celulosa.
- **Mesófilo.** Es una estructura compuesta por el tejido de parénquima fotosintetizador de la hoja. Se localiza entre dos capas epidérmicas, tiene lagunas aeríferas y sus células de parénquima no se diferencian en células en empalizada y células en esponja. Presenta, debajo de las capas epidérmicas, surcos de células dispuestas de manera más regular que las del resto del mesófilo.
- **Haces vasculares.** Son el floema y el xilema y los acompaña el parénquima del floema (ver antes). El conjunto de haces vasculares está envuelto por una capa de células de parénquima o de esclerénquima y por células suberizadas.
- **Fibras.** Es un conjunto de células en forma de U (o en forma de barra), adyacentes a los haces vasculares; forman bandas irregulares situadas en la epidermis abaxial y en la adaxial de la lámina.
- **Nervadura central.** Es una hilera doble de haces vasculares, una en el haz y la otra en el envés de la hoja, que está situada entre los dos parénquimas; contiene lagunas aeríferas.

Anatomía de la panícula

La panícula soporta las estructuras reproductivas de la planta y desarrolla actividad fotosintética. Tiene un eje principal que hacia la base de la panícula la conecta con el tallo, y hacia el otro extremo se prolonga en el raquis, el cual posee nudos y ramas primarias y secundarias. La panícula consta además de las siguientes partes (Figura 5):

- **Epidermis.** Es semejante a la de los nudos y a la del tallo.
- **Hipodermis.** Consta de capas de células de parénquima que se extienden debajo de la epidermis; corresponde a la exodermis de las raíces. Las células de la capa exterior tienen clorofila y las de la capa interior carecen de ella.
- **Haces vasculares externos.** Separan los parénquimas (interno y externo) y se diferencian de los haces vasculares internos.
- **Canal medular.** Contiene la médula como continuación del tallo.

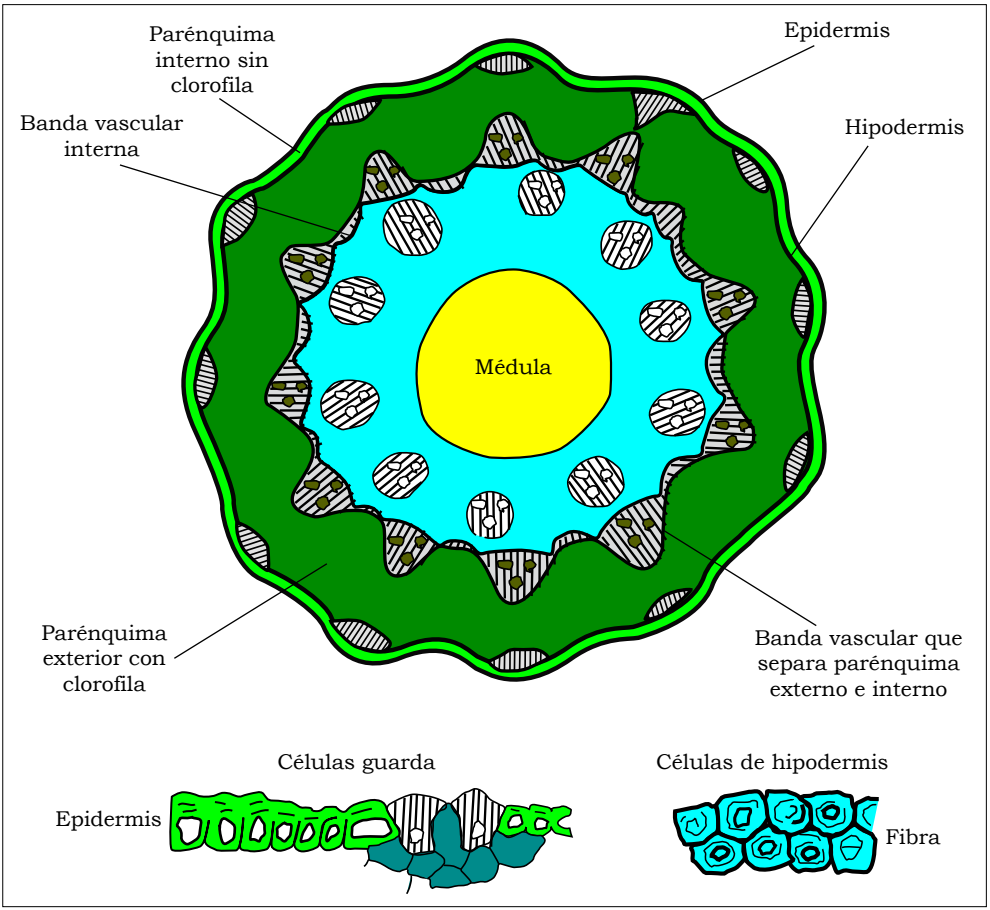


Figura 5. Corte transversal del eje (axis) de la panícula del arroz.

Anatomía de la semilla

El fruto del arroz es una cariópside, que consta de endospermo y de varias capas exteriores de células: la aleurona, el tegumento y el pericarpio. Ésta última consta de tres capas finas: mesocarpio, endocarpio y exocarpio. En ese fruto, el embrión de la semilla está adherido por un lado a la pared del ovario maduro o pericarpio (ver Figura 14); el otro lado está rodeado por el endospermo. La semilla como tal consta entonces de embrión y de endospermo.

El grano maduro tiene, además, glumas y se une al raquis por el pedicelo.

Enseguida se describen las estructuras asociadas al grano:

- **Gluma o cáscara.** Es la cubierta exterior del grano y tiene varias estructuras:
  - ***Lemma fértil, pálea y arista:*** La arista no siempre está presente.
  - ***Lemmas estériles:*** Son dos, situadas a cada lado del fruto, sobre la raquilla.
  - ***Raquilla:*** Es un tejido conectivo que une el pedicelo con la semilla.
- **Pericarpio.** Es un tejido de consistencia fibrosa al que siguen,

hacia adentro, el mesocarpio y la capa de células entrecruzadas.
- **Tegumento y aleurona.** Son dos tejidos que se encuentran después del pericarpio y constituyen la cubierta interior de la semilla.

Morfología de la planta de arroz

El conocimiento de la planta de arroz (*Oryza sativa* L.) y, en particular, de su morfología, es básico en la investigación porque en él se basan tanto la diferenciación de las variedades como los estudios de fisiología y de mejoramiento. Se describirán aquí la forma y la estructura de los principales órganos de la planta, tanto vegetativos (raíz, tallo, hojas) como reproductores (flor y semilla). En esta gramínea anual se destacan los tallos (clíndricos y huecos, con nudos y entrenudos), las hojas de lámina plana y angosta, unidas al tallo mediante vainas, y la inflorescencia en panícula. La planta puede medir desde 0.4 m (variedad enana) hasta 7 m (variedad flotante).

Órganos vegetativos

Raíz

Durante su desarrollo, la planta de arroz emite dos clases de raíces: las seminales (o temporales) y las adventicias (o permanentes). Se denominan también primarias y secundarias, respectivamente.

Las raíces ***seminales*** son poco ramificadas, viven un corto tiempo después de la germinación, y son reemplazadas por las raíces adventicias.

Las raíces ***adventicias*** brotan de los nudos subterráneos de los tallos jóvenes; en el arroz flotante brotan de los nudos del tallo que está sumergido en el agua y, en algunos casos, también de los nudos aéreos. En los primeros estadios de su crecimiento, son blancas, poco ramificadas y relativamente gruesas; en la medida en que la planta crece, las raíces se alargan, se adelgazan, se vuelven flácidas y se ramifican en abundancia.

Cuando ya están maduras, las raíces adventicias son fibrosas, emiten raíces secundarias y éstas producen pelos radicales. Es frecuente que estas raíces formen verticilos en los nudos que están sobre la superficie del suelo.

Las *puntas* de las raíces están protegidas por una masa de células semejante a un dedal, llamada coleorriza; su función es facilitar la penetración de la raíz en el suelo.

La forma en que crecen y se desarrollan las raíces del arroz es una característica varietal, que es influida por la naturaleza del medio de cultivo y por el nivel de fertilización. La *longitud* de las raíces decrece cuando se incrementa el nivel de nitrógeno en el medio de cultivo; cuando hay, en cambio, poco nitrógeno en el medio, las variedades de baja respuesta al nitrógeno tienen raíces más largas que las de alta respuesta a ese nutriente.

En los suelos inundados, la parte externa de las raíces activas se torna de *color* crema que llega hasta el amarillo rojizo; este color se debe a los compuestos férricos que precipitan en su superficie. En los suelos aireados, las raíces mantienen su color blanco. Las raíces del arroz pueden tomar un color negro cuando crecen en suelos cuyo contenido de compuestos sulfurosos es alto.

Tallo

El tallo del arroz consta de una sucesión alterna de nudos y entrenudos (Figura 6).

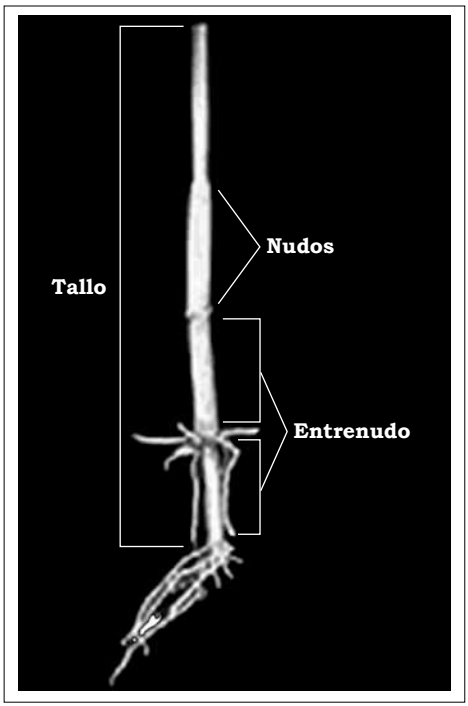


Figura 6. Tallo de una planta joven de arroz.

En cada nudo (o región nodal) se forman una hoja y una yema; esta última puede desarrollarse dando lugar a un hijo o macolla. De la yema que se encuentra en el nudo que da origen a la hoja principal, justo entre el nudo y la base de la vaina de dicha hoja, se forma la macolla característica de la especie *Oryza sativa.*

Los hijos primarios emergen sucesivamente del primero, del segundo y de los demás nudos que siguen al nudo principal del tallo antes descrito. Los hijos secundarios nacen del segundo nudo de cada hijo primario, y los hijos terciarios del segundo nudo de cada hijo secundario (Figura 7).

El *ángulo* que forman los hijos secundarios y los terciarios respecto al eje del tallo principal da lugar a los siguientes tipos de ramificación:

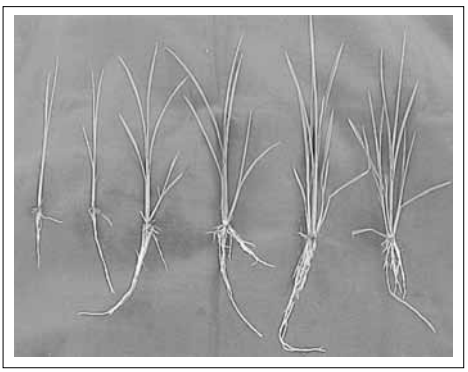


Figura 7. Macollamiento primario y secundario.

- Erecta, con un ángulo menor que 30°.
- Abierta, con un ángulo cercano a los 60°.
- Dispersa, con un ángulo mayor que 60°.
- Procumbente, con un ángulo de 90°; por tanto, un hijo formado en nudos inferiores del tallo principal tiende a yacer sobre la superficie del agua o del suelo.

El número *total de hijos* por planta es una característica varietal, que puede variar según el sistema de cultivo y el medio ambiente. Cuando el campo de arroz tiene poca densidad de plantas, la mayoría de los procesos de crecimiento se ajustan a una curva de tipo común; esta curva desciende después del máximo macollamiento porque han muerto algunos de los hijos, pero luego sigue paralela al eje de las abcisas, representando así a los hijos fértiles o válidos.

Hoja

Las hojas de la planta de arroz se distribuyen en forma alterna a un lado y a otro a lo largo del tallo. La primera hoja que aparezca en un nudo basal del tallo principal (o de alguno de los hijos) se denomina ***prófilo*** (Figura 8), el cual no tiene lámina y está constituido por dos brácteas aquilladas. Los bordes del

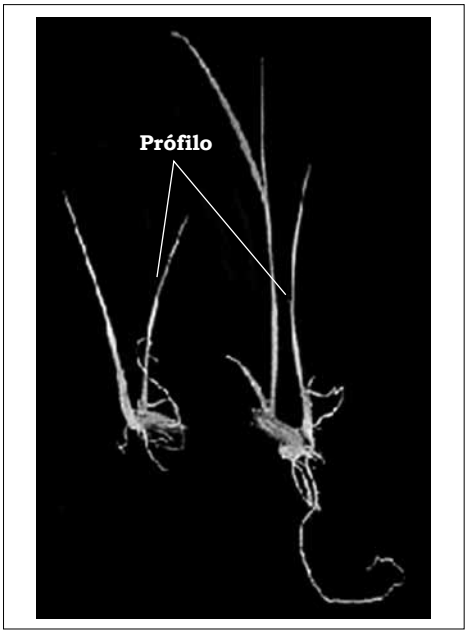


Figura 8. Prófilo o primera hoja basal del arroz.

prófilo se adhieren al dorso de los hijos jóvenes para asegurarlos al tallo.

En cada nudo, con excepción del nudo de la panícula, se desarrolla una hoja. La última hoja que nace en el tallo se encuentra debajo de la panícula, y es conocida como la ***hoja bandera***.

Partes de la hoja. En una hoja completa se distinguen tres partes principales: la vaina, el cuello y la lámina.

La ***vaina***, o base de la hoja, sale de un nudo y envuelve el entrenudo inmediatamente superior llegando, en algunos casos, hasta el nudo siguiente. Está dividida desde su base por una nervadura central y finamente surcada por haces vasculares. Es generalmente glabra y puede tener pigmentos de antocianinas en su base o en sectores de la superficie (en haz y en envés).

El *pulvínulo* de la vaina es una protuberancia situada más arriba del punto de unión de la vaina con el tallo; en ciertos casos, un observador lo puede confundir con el nudo.

El ***cuello*** es la unión de la vaina y la lámina; en él se encuentran la lígula y las aurículas:

- La ***lígula*** es una estructura triangular apergaminada o membranosa, situada en el interior del cuello y contigua a la vaina, que difiere en tamaño, color y forma, según la variedad de arroz.
- Las ***aurículas*** son dos apéndices del cuello que tienen forma de hoz y abrazan el tallo; en su parte convexa tienen un tejido en forma de dientes pequeños.

La lígula y la aurícula de la plántula de arroz sirven para distinguirla de las plántulas de algunas malezas comunes (Figura 9).

La ***lámina*** de la hoja es de tipo lineal, de punta aguda, larga y más o menos

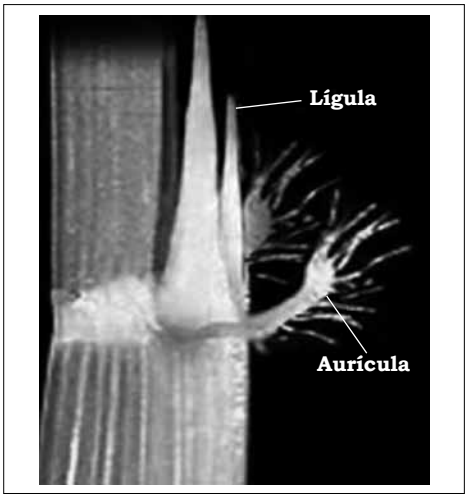


Figura 9. Lígula y aurícula de la hoja de arroz.

angosta, según las variedades. En el haz, o cara superior, sobresalen las venas paralelas que conforman el sistema vascular. A lo largo del envés, o cara inferior, corre por el centro una nervadura prominente; sobre ella, en ciertos casos, se enrolla la lámina.

Otras características
Respecto a la presencia de *vello foliar*, las hojas se clasifican como glabras, intermedias o pubescentes.

La presencia de *pigmentos* de antocianinas en los márgenes de la hoja, o en la lámina foliar, es un carácter varietal que se expresa de diverso modo según las condiciones ambientales. Se reconocen los siguientes colores y sus combinaciones en las hojas: verde pálido, verde común, verde oscuro, verde con márgenes púrpura o manchas púrpura, y púrpura.

La lámina de la *hoja bandera* es más corta y más ancha que la de las hojas anteriores a ella. Según la variedad de arroz, forma un ángulo diferente con el tallo (ver antes, ángulos de hijos) y adopta cuatro posiciones: erecta, intermedia, horizontal o descendente. Su tamaño está altamente correlacionado con la fertilización nitrogenada.

En el tallo principal se desarrollan más hojas que en los hijos primarios y en éstos más que en los secundarios; el número *total de hojas* del tallo principal varía mucho entre variedades (de 9 en unas hasta 23 en otras). Los tipos de arroz fotosensible, cuya fase vegetativa se retarda, pueden desarrollar un número de hojas mayor que 23.

La *vida de las hojas* es corta y para la época de floración solamente hay 4 ó 5 hojas verdes en cada tallo o hijo; de ellas, las dos hojas superiores son responsables de la fotosíntesis de un 75% de los carbohidratos que van al grano.

Órganos reproductores

Panícula
Las flores de la planta de arroz están reunidas en una inflorescencia compuesta denominada panícula. En la panícula se consideran el raquis o eje principal, las ramificaciones primaria y secundaria del raquis, las espiguillas, las flores (florecillas) y las semillas (Figura 10).

La panícula está situada sobre el nudo apical del tallo, llamado nudo ciliar o base de la panícula, y tiene generalmente la forma de un arco. En el nudo ciliar no se forma hoja ni yema de hijo, pero en él puede originarse la primera ramificación de la panícula y, según el caso, otras tres ramificaciones. Este nudo se toma como punto de referencia para medir la longitud del tallo y de la panícula. El entrenudo superior del tallo, en cuyo extremo se encuentra la panícula, se denomina *pedúnculo*. Su longitud varía mucho, según la variedad de arroz; en algunas variedades puede extenderse más allá de la hoja bandera o quedar encerrado en la vaina de ésta.

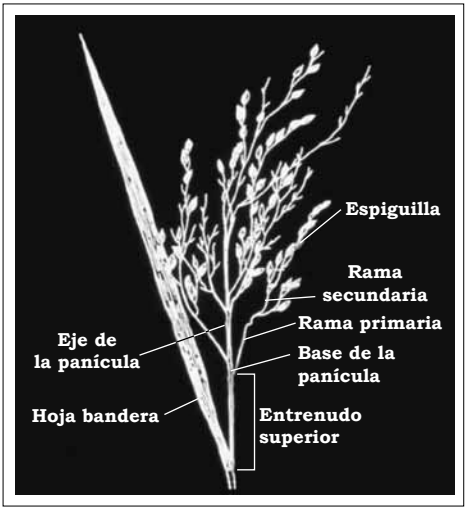


Figura 10. Estructura de la panícula del arroz.

Después de la floración, la emergencia de la panícula respecto al cuello de la hoja bandera se clasifica así:

- Emergencia *completa*: en que la base de la panícula sale completamente de la vaina de la hoja bandera y queda distante del cuello de ésta.
- Emergencia *semicompleta*: en que la base de la panícula está un poco más arriba del cuello de la hoja bandera.
- Emergencia *normal*: en que la base de la panícula coincide con el cuello de la hoja bandera.
- Emergencia *parcial*: en que la base de la panícula queda debajo del cuello de la hoja bandera.
- Emergencia *nula*: en que la panícula no emerge y queda encerrada dentro de la vaina de la hoja bandera.

Las panículas del arroz pueden clasificarse también como abiertas, cerradas o intermedias, según el ángulo que formen sus ramificaciones al salir del eje de la panícula (Figura 11).

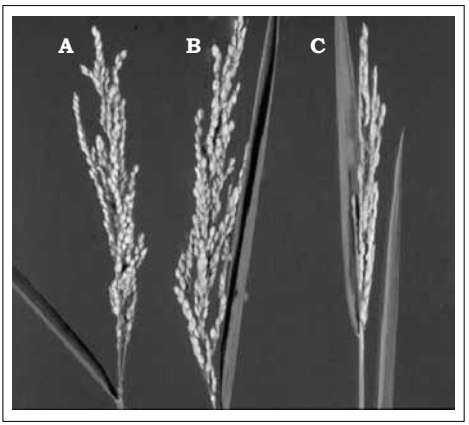


Figura 11. Clasificación de las panículas del arroz según el ángulo que formen sus ramificaciones con el eje de la panícula: (A) intermedia; (B) abierta; (C) cerrada.

Tanto el número de espiguillas por panícula como su peso son diferentes, según la variedad y el desarrollo de la planta o del hijo.

La panícula, que se mantiene erecta durante la floración, se dobla, generalmente, por el peso de los granos maduros. Hay variedades de tipo muy cerrado cuya panícula no se dobla cuando maduran los granos.

Raquis

El raquis o eje principal de la panícula es hueco y tiene nudos. Las protuberancias en la base del raquis se denominan pulvínulos paniculares.

En cada nudo del raquis nacen, individualmente o por parejas, *ramificaciones* que, a su vez, dan origen a ramificaciones secundarias, de las cuales brotan las espiguillas. Estas ramificaciones secundarias se presentan en diferentes densidades, característica que permite clasificarlas así:

- Ausentes: cuando no hay ramificaciones secundarias.
- Escasas: cuando hay pocas ramificaciones secundarias.
- Intermedias: cuando hay muchas ramificaciones secundarias, a veces varias por cada ramificación primaria.
- Abundantes: cuando las espiguillas brotan en grupos sobre las ramificaciones secundarias.

Espiguilla

La espiguilla, que es la unidad de la inflorescencia, está unida a la ramificación por el pedicelo. Las espiguillas del género *Oryza* contienen tres flores o florecillas, de las cuales una sola se desarrolla y es fértil. Una espiguilla consta de la raquilla, las florecillas y dos lemmas estériles (Figura 12). Las lemmas estériles, llamadas glumas rudimentarias, son dos brácteas que se alargan desde el

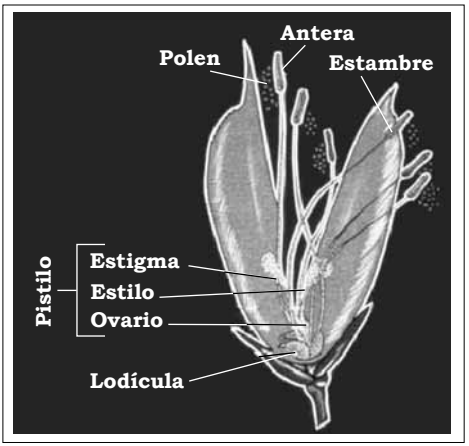


Figura 12. Estructuras de una florecilla de arroz.

pedicelo. La raquilla es el eje que sostiene la florecilla; las lemmas estériles rodean la raquilla por debajo.

En la espiguilla se encuentran además dos brácteas superiores, llamadas *glumas florales* o simplemente glumas, que son:

- la ***lemma***, que tiene forma de bote y presenta cinco nervaduras, y
- la ***pálea***, que tiene tres nervaduras y ocupa la posición opuesta a la lemma.

Estas brácteas superiores harán parte, más adelante, de la cáscara de la semilla. Cuando las espiguillas maduran, las glumas fértiles (o sea, la lemma y la pálea) exhiben diferentes *colores*, según la variedad de arroz; por ejemplo, color pajizo dorado con surcos dorados, fondo pajizo con manchas marrón oscuro, marrón amarillento, de rojizo a púrpura, púrpura y negro.

La lemma y la pálea presentan diferentes grados de *pubescencia*, según la variedad; pueden ser glabras, con pubescencia en la quilla de la lemma, o pubescentes en su parte más alta; la vellosidad puede ser muy corta o muy larga.

La nervadura central de la lemma se llama *quilla*, que puede ser lisa o pubescente. La *arista* es una prolongación filiforme de la quilla, localizada en el ápice de la lemma. La arista puede ser corta o larga y su tamaño está condicionado por factores hereditarios y por el medio ambiente. Una vez completada la floración, es posible detectar la presencia de la arista, cuyo desarrollo es parcial a veces; también puede estar ausente.

Flor

La flor (o florecilla) tiene seis estambres y un pistilo. Los estambres son filamentos delgados que sostienen las anteras; éstas son alargadas y bífidas y contienen los granos de polen (Figura 13). En el pistilo se distinguen el ovario, el estilo y el estigma. El ovario es de cavidad simple y contiene un solo óvulo. El estilo es corto y termina en un doble estigma plumoso. El estigma presenta diferentes colores, según la variedad de arroz: puede ser blanco, verde pálido, amarillo, púrpura pálido o púrpura.

Las *lodículas* son dos protuberancias redondeadas y transparentes que se encuentran en la base de la flor, y son responsables de la apertura floral. Durante la antesis, las lodículas se ponen turgentes y así logran que la lemma y la pálea se separen; simultáneamente, los estambres y las anteras se alargan y emergen (Figura 17). La dehiscencia de las anteras puede ocurrir antes de que abran las glumas o al tiempo con la apertura de éstas; la florecilla, sin embargo, tiene tendencia a la cleistogamia (polinización con la flor cerrada). Después de que las anteras hayan derramado el polen, las glumas se cierran; esta operación dura de 5 a 60 minutos.

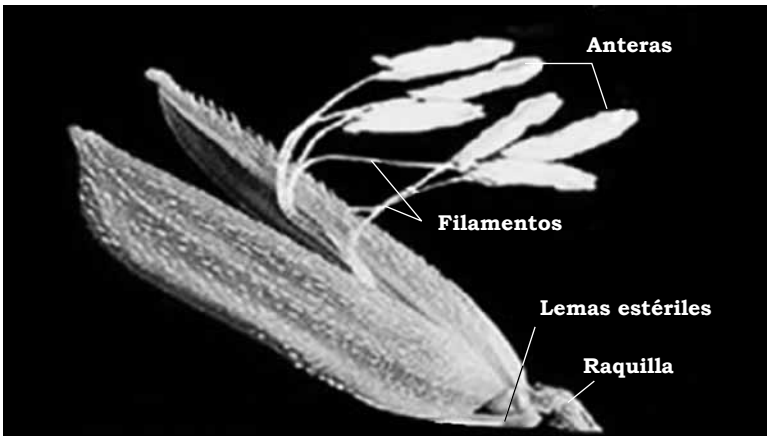


Figura 13. Estructuras internas de la flor.

Semilla
La semilla de arroz corresponde a un ovario maduro, seco e indehiscente, que consta de las siguientes partes (Figura 14):

- La cáscara, conformada por la lemma, la pálea y las partes asociadas a estas dos estructuras.
- Las lemmas estériles, la raquilla, la arista y el embrión, que está situado en el lado ventral de la semilla, cerca de la lemma.
- El endospermo, que provee alimento al embrión durante la germinación.

Estructuras
El grano de arroz descascarado es una ***cariópside*** que aún conserva el pericarpio, y se conoce por ello como arroz integral. El pericarpio puede ser blanco, marrón pálido, rojo, púrpura suave o púrpura intenso. El denominado 'arroz rojo' tiene el pericarpio de color rojo y, en algunos tipos de arroz, también el tegumento.

Debajo de la lemma y la pálea se encuentra el ***pericarpio***, que está formado por tres capas de células fibrosas muy duras (endocarpio, mesocarpio y exocarpio). Inmediatamente debajo del pericarpio encontramos dos capas ricas en proteína, que son el tegumento y la aleurona (Figura 14).

El ***embrión*** consta de la plúmula, que son las hojas embrionarias, y de la radícula, que es la raíz embrionaria primaria. La plúmula está cubierta por el coleóptilo y la radícula está envuelta por la coleorriza. El embrión está separado del endospermo por un tejido llamado *escutelo*.

Hay variedades de arroz que tienen el ***endospermo*** glutinoso o ceroso. En ellas, la fracción almidonosa, compuesta casi íntegramente por amilopectinas, es opaca, y se reconoce porque toma una coloración marrón rojiza en presencia del lugol (solución de yodo y yoduro potásico que detecta polisacáridos).

Otras variedades tienen el tipo común de endospermo almidonoso, que no es glutinoso; en ellas, la fracción almidonosa contiene amilosa y amilopectina, y adquiere un color azul

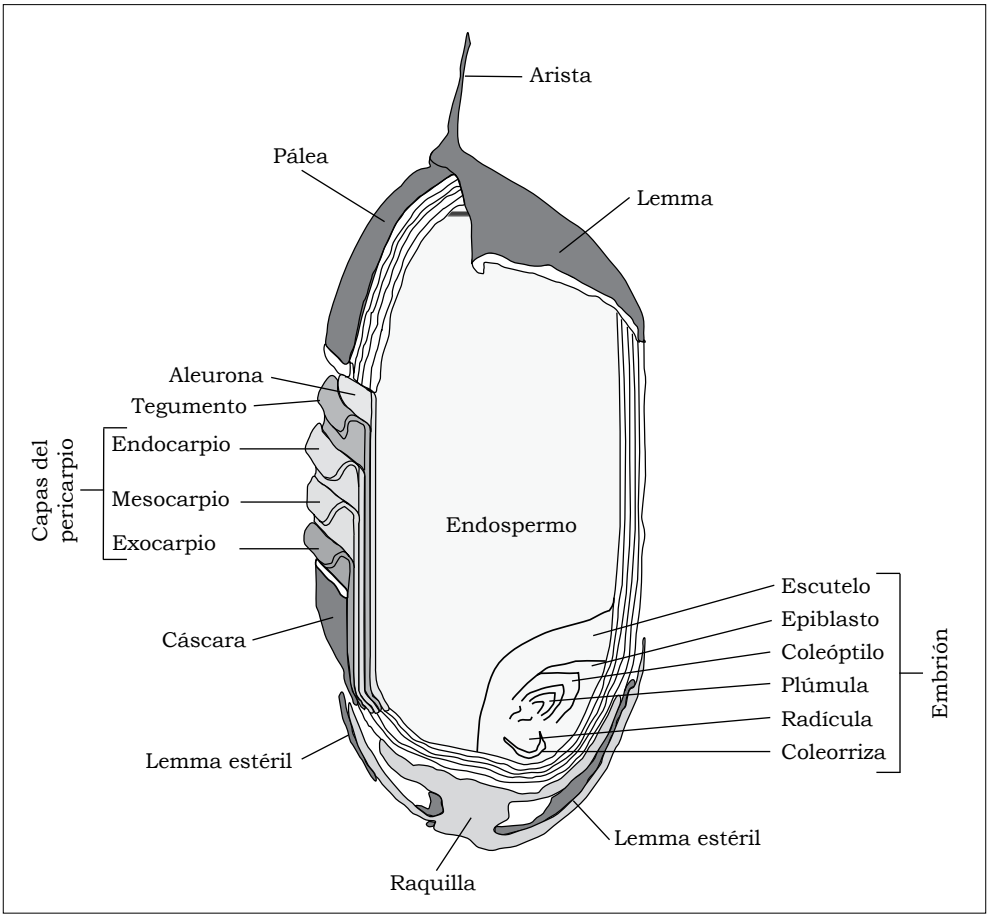


Figura 14. Estructuras interna y externa de la semilla de arroz.

oscuro con el lugol. El endospermo blanco consiste principalmente de gránulos de almidón envueltos en una matriz proteínica; contiene, además, vitaminas, azúcares, grasas, fibra cruda y minerales (cenizas).

Los granos de arroz descascarados y pulidos tienen grados diferentes de *transparencia*. Pueden ser translúcidos, semitranslúcidos y opacos. Algunos presentan manchas opacas en su parte central (abdomen) o en su dorso. Los granos de arroz descascarado se clasifican también según su *longitud*; hay granos extralargos (EL) de 7.5 mm o más, granos largos (L) de 6.6 a 7.4 mm, granos medios (M) de 5.6 a 6.5 mm, y granos cortos (C) de 5.5 mm o menos.

Germinación

Las semillas de arroz que no tienen latencia pueden germinar inmediatamente después de su maduración. Las que tienen latencia pasan por un período natural de reposo más o menos largo. La latencia puede interrumpirse artificialmente descascarando las semillas o sometiéndolas a tratamientos especiales que facilitan la germinación.

Muchas de las estructuras de una semilla que germina son temporales, como el *coleóptilo* y la *coleorriza*; tienen la función de proteger otras estructuras o de ayudar a la plántula a establecerse mientras se desarrollan las estructuras permanentes.

Cuando las semillas germinan bajo el agua, el coleóptilo, que contiene la hojas embrionarias, emerge antes que la coleorriza. Cuando las semillas germinan en medio aéreo, como un suelo con buen drenaje, surge primero la coleorriza. Poco después de emerger la radícula, sale la coleorriza y se alarga (Figura 15). La siguen dos o más raíces seminales, las cuales desarrollan raíces laterales. Estas raíces morirán más tarde y serán reemplazadas por raíces secundarias adventicias.

El coleóptilo emerge como una estructura cilíndrica; cuando se rompe por el ápice, salen la hoja primaria y luego la secundaria (Figura 15).

El mesocótilo se alarga cuando las semillas germinan bajo el agua; de este modo eleva el coleóptilo sobre la superficie para que pueda emerger bien la plúmula.

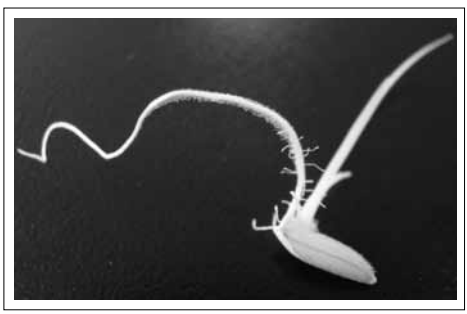


Figura 15. Germinación de la semilla de arroz: se inicia el desarrollo de los órganos de la planta a partir del embrión.

Referencias bibliográficas

Angladette, A. 1969. El arroz. 1ª ed. Colección Agricultura Tropical. Editorial Blume, Barcelona. 867 p.

Bayer Químicas Unidas. 1962. Bosquejo histórico-social del arroz. Arroz 11(126). Fedearroz, Bogotá.

Chandler, R.F. Jr. 1979. Rice in the tropics: A guide to the development of national programs. Inter-agriculture Development Service. Westview, CO, EE.UU. 256 p.

Chang, Te-Tzu. 1964. Present knowledge of rice genetics and cytogenetics. Boletín Técnico 1. International Rice Research Institute (IRRI), Los Baños, Filipinas. 4 p.

Chang, T.T.; Bárdenas, E.A. 1965. The morphology and varietal characteristics of the rice plant. Boletín Técnico No. 4. International Rice Research Institute (IRRI), Los Baños, Filipinas.

Chang, T.T.; Loresto, G.C. [1968]. The anatomical and histological features of the rice plant. International Rice Research Institute (IRRI), Los Baños, Filipinas. (Trabajo sin publicar)

Cheaney, R.L. 1968. Cultivo del arroz: Manual de producción. Limusa, México D.F., México. 426 p.

Cheaney, R.L. 1974. Historia del arroz como cultivo importante. Programa de Arroz. Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), Cali, Colombia. 7 p.

Efferson, J. 1956. The story of rice. Rice Journal (número del año).

Font Quer, P. 1973. Diccionario de botánica. Labor, Barcelona, España.

González F., J. 1975. Morfología de la planta de arroz: Curso de arroz, 1ª parte. Temas de orientación agropecuaria no. 112. Fedearroz, Bogotá, Colombia.

González F., J. 1985. Origen, taxonomía y anatomía de la planta de arroz. (*Oryza sativa* L.). In: Tascón, E.; García, E. (eds.). Arroz: Investigación y producción. Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT) y Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD), Cali, Colombia. p. 47-64.

González, H. 1981. Origen y morfología de la planta de arroz. In: Curso de adiestramiento en producción de arroz. Instituto Nacional de Investigación y Promoción Agropecuarias (INIPA), Chiclayo, Perú. p. 1-29.

INIPA (Instituto Nacional de Investigación y Promoción Agropecuarias). 1981. Curso de adiestramiento en producción de arroz. Estación Experimental Vista Florida, Chiclayo, Perú. 504 p.

IRRI (International Rice Research Institute). 1964. Rice genetics and cytogenetics. Memorias de un simposio reunido en Los Baños, Filipinas, en febrero de 1963. Elsevier, Nueva York.

IRRI (International Rice Research Institute). 1980. Descriptors for rice (*Oryza sativa* L.). Manila, Filipinas. 21 p.

Jennings, P.R. 1961. Historia del cultivo de arroz en Colombia. Agricultura Tropical (Bogotá) 17(2).

León, J. 1968. Fundamentos botánicos de los cultivos tropicales. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA).

Mahatatra, I.C.; Sharma, A.C. 1970. Studies on the growth and development of the rice plant. Il Riso 19(1):55-79.

Poehlman, J.M. 1979. Breeding field crops. 2a. ed. AVI, Westport, CT, EE.UU.

Porter, C.O. 1959. Taxonomy of flowering plants. Freeman, San Francisco, CA, EE.UU.

Pureglobe, J.W. 1972. Tropical crops: Monocotyledons I. 1ª ed. Longmans Group, Londres. 334 p.

Roschevicz, R.J. 1932. Documents sur le genre *Oryza*. Revue de Botanique Appliquée a l'Agriculture Tropicale 135:949-961.

RICE (Rice Information Cooperative Effort). 1967. Rice production manual. University of the Philippines e International Rice Research Institute (IRRI), Los Baños, Filipinas. 345 p.

Vasconcellos, J. de C.E. 1963. O arroz. 2a. ed. Ministerio de Economía, Lisboa. 307 p.

Vaughan, D.A. 1994. The wild relatives of rice: A genetic resources handbook. International Rice Research Institute (IRRI), Los Baños, Filipinas. 137 p.

Yoshida, S. 1977. Physiological consequences of altering plant type and maturity. International Rice Commission Newsletter No. 25.

Zhukovsky, P.M. 1971. Las plantas cultivadas y sus ancestros.

Capítulo 5

Índices fisiotécnicos, fases de crecimiento y etapas de desarrollo de la planta de arroz

Alfredo de J. Jarma
Víctor Degiovanni
Rafael A. Montoya

Contenido

	Página
Resumen	60
Abstract	61
Introducción	61
Índices fisiotécnicos para el crecimiento y el desarrollo	63
Curvas de crecimiento	63
Parámetros cuantificables del análisis	64
Tasas de crecimiento	66
Procesos y factores en la producción de materia seca	68
Fotosíntesis	68
Carbohidratos sintetizados y rendimiento de grano	69
Relación fotosíntesis/fotosintatos	70
Crecimiento y desarrollo	70
Fases del crecimiento	71
Etapas del desarrollo	73
Referencias bibliográficas	78

Resumen

Se describen los índices o indicadores más usados por los investigadores para el análisis de crecimiento de las plantas, información utilizada por investigadores, auxiliares técnicos y agricultores para optimizar la producción de los cultivos. Estos índices son parámetros que permiten cuantificar el crecimiento de un órgano de la planta o de una población de plantas. Mediante componentes relativamente sencillos, permiten analizar la habilidad de una especie vegetal para desarrollarse en un ambiente dado, comparar esa habilidad con la de otras especies, y explicar el comportamiento de una especie vegetal en función del tiempo. Pueden agruparse en: (1) índices fisiotécnicos para el crecimiento y el desarrollo, que incluyen curvas de crecimiento (p. ej., la curva sigmoide); parámetros cuantificables del análisis, que incluyen tasas de crecimiento absoluto, relativo, simples, compuestos, al igual que el índice de duración y la producción total de materia seca; y tasas de crecimiento. Se describen las tasas de crecimiento que se emplean con más frecuencia en los estudios de la

planta y el cultivo de arroz: tasa de crecimiento absoluto (TCA), tasa de crecimiento relativo (TCR), relación de área foliar (RAF), índice de área foliar (IAF), tasa de asimilación neta (TAN) y tasa de crecimiento del cultivo (TCC). Igualmente se indican los diferentes procesos y factores que intervienen en la producción de materia seca, como la fotosíntesis, los carbohidratos producidos por la fotosíntesis (los cuales contribuyen al rendimiento de grano) y la relación fotosíntesis/fotosintatos. Se describen en detalle las fases del crecimiento (vegetativa, reproductiva y de madurez fisiológica), y las etapas del desarrollo de la planta de arroz según la escala BBCH.

Abstract

Physical-technical indicators, growth phases, and development stages of the rice plant

The indexes or indicators most commonly used by researchers to analyze plant growth—an information used by researchers, technicians, and farmers to optimize crop production—are described. These indicators are parameters that help quantify the growth of a plant organ or population, analyze the ability of a plant species to grow in a given environment, compare this ability with that of other species, and explain the performance of a given plant species over time. They can be grouped into physical-technical indicators of growth and development, which include growth curves (for example, sigmoid curves); quantifiable parameters for analysis, which include growth rates (absolute, relative, simple, compound) as well as duration index and total dry matter production; and growth rates. The growth rates most frequently used to study the rice plant and crop are described in detail: absolute growth rate (AGR), relative growth rate (RGR), leaf area ratio (LAR), leaf area index (LAI), net assimilation rate (NAR), and crop growth rate (CGR). The different processes and factors that intervene in dry matter production are also indicated, such as photosynthesis, the carbohydrates produced during photosynthesis (which contribute to grain yield), and the photosynthesis/photosynthate ratio. The growth phases (vegetative, reproductive, and physiological maturity) of the rice plant are described in detail as well as its different development stages, according to the BBCH scale.

Introducción

En algún momento de su vida, todo organismo vivo es capaz de crecer si se dan las condiciones adecuadas. Este crecimiento implica cambios en tamaño, en forma o en número de individuos (o en varios aspectos a la vez). El proceso de cambio en estos tres aspectos, que es uno de los fenómenos más importantes de los sistemas vivos, ayuda a distinguir al organismo vivo del que no lo está. Ahora bien, no es fácil dar una definición de 'crecimiento' ni aun para los organismos que se auto-replican. Sin embargo, una definición aceptable de crecimiento vegetal sería la siguiente:

> ***es un cambio irreversible en el tiempo, que se da principalmente en tamaño, habitualmente en forma y ocasionalmente en número.***

La cinética del crecimiento de la planta de arroz obedece a tres factores principales:

1. El *tamaño* de la planta o de la población. Cuanto mayor sea el número de células en división (o de individuos en reproducción) y en alargamiento, mayor será el crecimiento en una etapa inicial.
2. La *relación* entre el tamaño actual de la planta y el que pueda alcanzar ésta al final del proceso de cambio.

Igualmente, entre el tamaño actual y final de una población, dadas ciertas condiciones. Esta relación expresa, en parte, la edad fisiológica de las células: cuanto más jóvenes o meristemáticas sean éstas, más rápida será su multiplicación. Aunque la planta adulta tenga muchas células, su crecimiento será lento porque pocas de ellas se dividen.

3. Una *constante*, específica del arroz y diferente en cada especie.

Toda acción fisiológica es influida por el medio externo y depende estrechamente, además, de la energía liberada en el proceso de respiración. Puesto que la respiración consiste en una serie de reacciones termoquímicas, el crecimiento de un organismo vegetal dependerá principalmente de la *temperatura* como factor del medio. Por tal razón, la curva de crecimiento tendrá un mínimo hacia los 5 ó 10 °C, un óptimo hacia los 35 °C y un máximo hacia los 45 °C. Entre los 10 y los 30 °C, aproximadamente, el crecimiento sigue la ley de Van't Hoff, es decir, su Q_{10} se aproxima a 2 (Q_{10} se define como la velocidad de reacción enzimática por cada incremento de temperatura de 10 °C). El valor óptimo de la temperatura para el crecimiento no coincide con ese óptimo en otras funciones importantes, principalmente en la fotosíntesis; por ello, las plantas expuestas de modo constante a temperaturas de 30 °C o mayores se muestran débiles y cloróticas y exhiben el fenómeno del 'crecimiento forzado'.

La *luz* es el segundo factor del medio que tiene una importancia grande en el crecimiento vegetal. Las plantas que crecen con poca luz tienen un contenido bajo de clorofila, se alargan en su eje longitudinal, y se retardan en su desarrollo foliar. Este fenómeno se denomina ahilamiento o etiolación.

El crecimiento tiene sus propias leyes, obedece a reguladores hormonales y es, en suma, una expresión de la fisiología general de la planta. Por consiguiente, la curva de crecimiento sólo será normal en un *medio ecológico* cercano al óptimo; las variaciones o deficiencias de los factores del medio se reflejarán entonces en desviaciones de la curva esperada de crecimiento normal.

La *curva de crecimiento* vegetal se construye con mediciones relativamente fáciles de hacer en el campo, al menos en plantas (y en cultivos), cuyo aumento en tamaño queda bien representado por la medición de la altura de la planta a través del tiempo, como ocurre en los cereales. Muchos investigadores han graficado también el aumento de peso de un organismo en función del tiempo para obtener una curva de crecimiento; esta curva puede ajustarse, mediante una función matemática sencilla, si se desea obtener una recta o una curva en forma de S (Jarma, 2005).

Las prácticas agronómicas, como el manejo de las malezas, de los insectos plaga y de las enfermedades, la nutrición del cultivo y la aplicación de riego y labores de cosecha, están relacionadas con una o más etapas y fases del crecimiento de la planta. El crecimiento puede evaluarse tomando datos de área foliar o de peso seco en el tiempo; si se toman dos mediciones consecutivas, por ejemplo, con intervalos de 3 días, se puede conocer el aumento de biomasa. Un aumento en tamaño es, a menudo, la expansión de órgano en una dirección solamente, como la altura del tallo o el diámetro de una rama, o en dos direcciones, como ocurre con el área de una hoja.

En conclusión, cuando el crecimiento de la planta se considera desde la fisiología del cultivo, sólo podrá comprenderse correlacionando las múltiples variables

que actúan sobre ese cultivo. Esta información integradora representa una herramienta cotidiana para los investigadores, los auxiliares técnicos y los agricultores que interactúan en la tarea de optimizar la producción del segundo cereal más importante del mundo.

Índices fisiotécnicos para el crecimiento y el desarrollo

Curvas de crecimiento

Curva sigmoide

La curva que describe, en general, los cambios de tamaño en el crecimiento de un organismo, un órgano, un tejido, una población de células o de una célula individual tiene forma sigmoide (o sea, imita una letra 'ese') (Moore, 1979). En este tipo de curvas se distinguen tres fases principales (Figura 1):

- Una inicial de corta duración, en la que el crecimiento es lento y corresponde (en los vegetales) al estado de plántula; se llama ***fase logarítmica***.
- Una central de rápido crecimiento, que corresponde al período vegetativo de la planta; se llama ***fase lineal***.
- Una final, en la que el crecimiento se desacelera progresivamente hasta hacerse nulo, y corresponde, en las plantas, a la floración y a la maduración del fruto; se llama ***fase de senescencia***.

Este tipo de curvas representa el crecimiento de las plantas de arroz y de muchas especies, aunque hay especies y órganos vegetales que tienen curvas de crecimiento diferentes.

Fase logarítmica. El tamaño (p. ej., la altura) del organismo aumenta en forma exponencial con el tiempo. Es decir, el crecimiento no es muy rápido al principio, pero al poco tiempo aumenta en forma continua. Esta rapidez es proporcional al tamaño del organismo considerado: cuanto mayor sea éste, más rápido crece. Una célula individual presenta también la fase logarítmica de crecimiento.

Fase lineal. El organismo continúa aumentando en tamaño a una velocidad

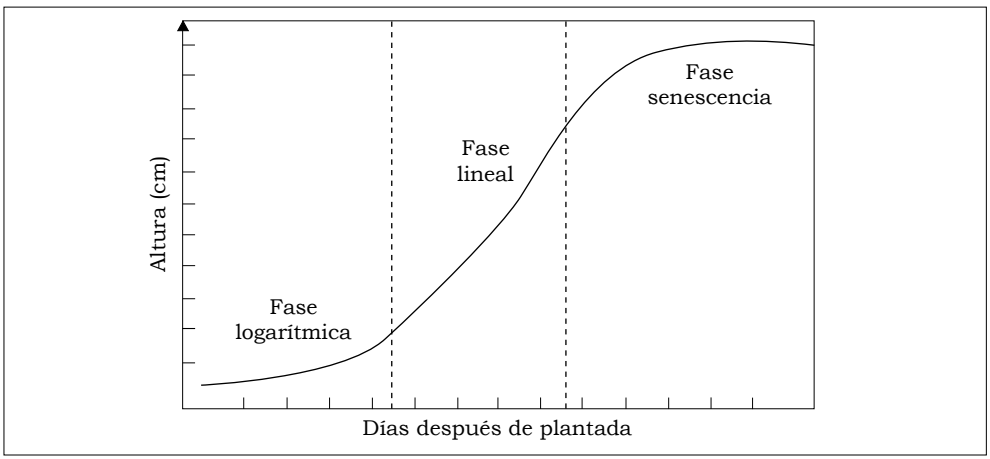


Figura 1. La altura que adquiere la planta de arroz en función del tiempo genera una curva sigmoide de crecimiento.

constante, que tiende normalmente a los valores máximos durante algún tiempo. No siempre es clara la razón de que la velocidad del crecimiento sea constante y no proporcional al tamaño creciente del organismo; si se mide, por ejemplo, el crecimiento de un tallo sin ramas, la fase lineal expresaría simplemente la actividad constante de su meristemo apical.

Fase de senescencia. En esta fase, la velocidad del crecimiento tiende a disminuir, puesto que la planta alcanza su madurez (etapa final del crecimiento) y comienza a envejecer.

Otras curvas
En un análisis del crecimiento es muy útil hacer, además de la curva de tamaño en función del tiempo antes descrita, la gráfica del log del tamaño en función del tiempo, así como la velocidad del crecimiento (o tasa de crecimiento) respecto al tiempo, tal como se indica en las Figuras 2,A y 2,B, respectivamente (Jarma, 2005).

Parámetros cuantificables del análisis

La curva que describe la cinética del crecimiento de la planta de arroz durante su vida es, generalmente, de tipo sigmoide simple; para construirla se miden diversos factores. Conviene recordar que el crecimiento se evalúa, principalmente, haciendo medidas secuenciales del tamaño de la planta, de su forma o de cierto número de datos primarios. Una vez obtenidos los datos directos en el campo, tales como la altura de la planta, el número de macollas por planta, la materia seca y otros, el siguiente paso es analizarlos. Para hacer este análisis, se construyen las formas correspondientes a cinco tipos principales de cantidades derivadas, que son los siguientes:

Tasas de crecimiento absoluto
Son tasas simples del cambio de una sola variable a través del tiempo, que miden el comportamiento de ésta; por ejemplo, el incremento de la masa seca con el tiempo, el número de macollas de la planta a lo largo del tiempo, el número de hojas por planta respecto al tiempo.

Tasas de crecimiento relativo
Son tasas de cambio un poco más complejas que miden el incremento de un parámetro en un intervalo de tiempo en relación con el valor inicial de dicho parámetro. Un ejemplo sería el incremento de la masa seca de la planta por unidad de masa seca.

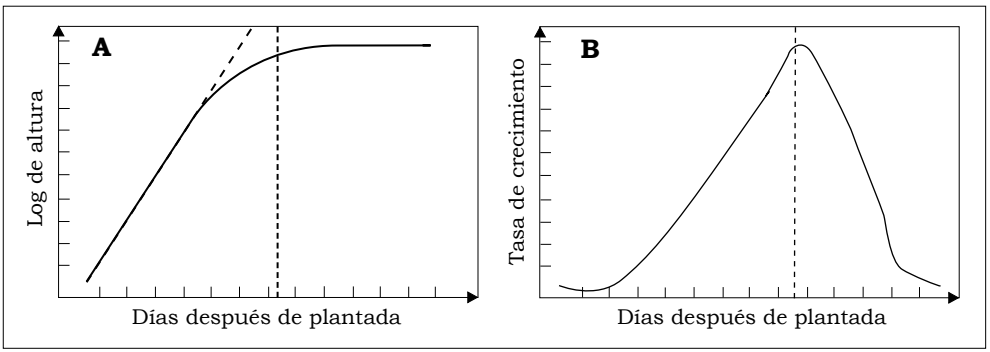


Figura 2. (A) Curva de crecimiento logarítmica para la altura de la planta de arroz respecto al tiempo transcurrido después de su plantación; (B) Curva de la tasa de crecimiento (cm/día) respecto al tiempo.

Tasas de crecimiento simples
Son tasas que relacionan dos variables similares, como el incremento de la masa seca total de la hoja y el de la planta, o no similares, como la masa seca de la hoja y su unidad de área foliar. Son útiles, por ejemplo, para determinar la distribución de la materia seca dentro la planta, y para explicar el crecimiento de un órgano en relación con otro.

Tasas de crecimiento compuestas
Son las que involucran más de una variación de la planta, como la tasa de incremento de la masa seca total de la planta por unidad de área foliar. En ocasiones, una de las variables no es, necesariamente, de la planta; por ejemplo, la producción de biomasa por unidad de suelo.

Índice de duración
Es el cálculo del área bajo la curva generada por una variable primaria o derivada respecto al tiempo; por ejemplo, bajo la curva de crecimiento del área foliar respecto al tiempo hay un área que representa la duración del área foliar considerada (Jarma, 2005).

Producción total de materia seca
El rendimiento de grano del arroz depende ampliamente de la *producción* total de materia seca y de la *distribución* de ésta hacia los granos. La producción total de materia seca se logra en dos fases diferentes de la vida de la planta: la prefloración y la posfloración. La cantidad de materia seca acumulada proporcionalmente en estas dos fases varía con la duración tanto del ciclo de vida de cada variedad como de las condiciones ambientales en que la variedad se desarrolla (Fernández, 1978; Jarma, 2005). La distribución de la biomasa, por su parte, sigue una tendencia general que podría resumirse así:

Antes de la floración. Las sustancias producidas en las hojas que sean fotosintéticamente activas (los carbohidratos) se *almacenan* en éstas o se *traslocan* a otros órganos (por ejemplo, las raíces o los tallos) según la función que desempeñen las hojas en ciertas etapas del ciclo de vida, es decir, la de un órgano importador o exportador, respectivamente, de carbohidratos. En las etapas anteriores a la floración, es fundamental que la planta de arroz reciba una adecuada *radiación solar* para que su tasa de fotosíntesis sea óptima y concuerde con el desarrollo del dosel de follaje. Dejando aparte otros factores, el factor radiación desempeña un papel decisivo en el desarrollo de una población de arroz en el campo.

Después de la floración. De la materia seca total acumulada en los granos, 90% se produce después de la floración; el 10% restante proviene de los tallos y de las hojas, donde se acumuló antes de la floración. Los fotoasimilados (azúcares y almidones) que se formaron en los tejidos verdes de la planta se distribuyen así:

- Una quinta parte se acumula (en tejidos foliares y caulinares) antes de la iniciación de la panícula (etapas 1, 2 y 3 del ciclo de vida de la planta).
- En la floración, cuando los azúcares van a las espiguillas (etapas 1 a 6), se acumula la mitad de los fotoasimilados producidos en esa fase; la otra mitad lo hace después de la fertilización del ovario, durante la formación del grano (etapas 7, 8 y 9).
- En la madurez, alrededor del 95% de los azúcares de la parte aérea de la planta está en los granos y sólo un 5% permanece en los tallos y en las hojas (Degiovanni, 2003).

La producción de materia seca en la planta de arroz está estrechamente relacionada con su *área foliar*. Los máximos valores de esa producción se registran exactamente

en el momento en que se inicia el macollamiento. Los índices de área foliar máximos que se alcanzan en ese tiempo corresponden al desarrollo total del dosel de follaje de la planta.

Tasas de crecimiento

A continuación se describen las tasas de crecimiento que se emplean con más frecuencia en los estudios de la planta y el cultivo de arroz. En todas las expresiones siguientes, W es la masa seca, Af es el área foliar, As es la superficie de terreno, y T es el tiempo, que generalmente se expresa en días (Collins, 1977).

Tasa de crecimiento absoluto (TCA)
Es el índice de crecimiento de la planta más sencillo que se maneja. La TCA mide la ganancia de biomasa a través del tiempo, aunque es posible emplear otro parámetro (diferente de biomasa); por ejemplo, el incremento en el número de órganos discretos tales como hojas o raíces (Jarma et al., 1999).

La TCA, cuyas unidades son g/día (también $g \cdot día^{-1}$), se calcula así:

$$TCA = \frac{W_2 - W_1}{T_2 - T_1}$$

Tasa de crecimiento relativo (TCR)
Expresa el incremento en masa seca, respecto a la masa seca inicial, durante un intervalo de tiempo. Representa la *eficiencia de la planta* como productora de nuevo material y ha sido propuesta como medida que integra el comportamiento fisiológico de las plantas. Es análoga a la tasa de interés compuesto del mundo financiero. Se aplica generalmente a la masa seca, pero se pueden usar otras medidas; por ejemplo, la TCR del área foliar o la tasa relativa de incorporación de un nutriente. La TCR se calcula así:

$$TCR = \frac{\log W_2 - \log W_1}{T_2 - T_1}$$

Se expresa en g/g por día. Si se emplean otras variables, sus unidades de medida cambiarán; por ejemplo, la TCR del área foliar podría expresarse en cm^2/cm por día, y la TCR de la incorporación de un nutriente sería mg/mg por día (Jarma, 2005).

Los resultados de varios trabajos sostienen la hipótesis de que los valores mínimos de la TCR se observan después de la ocurrencia de los valores máximos del IAF. En tal caso, los valores altos que presente la TCR, bajo condiciones normales, empezarían a disminuir con la edad de la planta; buena parte de esta disminución se debería, en el arroz, al aumento gradual de tejidos no asimilatorios, como los de la panícula que hace por entonces su aparición. Los estudios realizados por Collins (1977) en Kennebec confirman que el aumento de la TCR coincide con la disminución del valor del IAF, en condiciones de campo.

Relación (razón) de área foliar (RAF)
Es una medida del equilibrio que se da entre los potenciales de capacidad fotosintética y de costo respiratorio. Se calcula como la razón entre el área foliar total por planta y la masa seca total por planta en dos momentos (1 y 2, en la fórmula) del tiempo de crecimiento del vegetal, y éstos se promedian:

$$RAF = \frac{(Af_1 / W_1) + (Af_2 / W_2)}{2}$$

Este índice expresa, en todo momento de la vida de la planta, la relación proporcional entre el área foliar, cuya fotosíntesis mantiene a toda la planta, y la masa seca generada por la fotosíntesis. Por lo regular, las plantas cuya RAF es alta producen mucha materia orgánica. La RAF se expresa, generalmente, en cm^2/g.

Índice de área foliar (IAF)
Es un cálculo aproximado de la *capacidad productiva* de la comunidad vegetal (el cultivo). El índice mide la relación entre la superficie asimilatoria (el follaje extendido) y la superficie de suelo ocupada por ese follaje. El IAF expresa la magnitud del área que el cultivo expone a la radiación solar incidente para que realice la fotosíntesis. Es una relación absoluta (entre dos áreas) y por ello no tiene unidades. El IAF puede estimarse en varias etapas del cultivo (Jarma, 2005) y se calcula así:

$$IAF = \frac{Af}{As}$$

Tasa de asimilación neta (TAN)
Se denomina también tasa foliar unitaria o índice de eficiencia fotosintética. Es un índice de la *eficiencia de las plantas*, considerada ésta no en relación con la masa seca, sino con el área foliar total. Puesto que el área foliar es la región productiva de la planta, es lógico expresar el crecimiento —o la eficiencia con que éste se logra— en función de esa área; esta expresión sería así una medida directa de la eficiencia productiva de la planta (Jarma, 2005).

La TAN se define también como el incremento de material vegetal por unidad de tejido asimilatorio, por unidad de tiempo. Sus unidades son g/cm por día y se expresa así:

$$TAN = \frac{W_2 - W_1}{T_2 - T_1} * \frac{\log Af_2 - \log Af_1}{Af_2 - Af_1}$$

La valoración de la *eficiencia fotosintética* por unidad de área foliar en el arroz presenta grandes variaciones entre los diferentes grupos de variedades y dentro de ellos (Nagamine, 1990):

- Las variedades *tradicionales* de porte alto y de larga duración tienen, muchas veces, una eficiencia fotosintética (o una tasa foliar unitaria) más alta y una duración de la materia seca total mayor que las variedades *modernas semienanas*; éstas son de corta duración pero su rendimiento es alto (Murty, 1978). No obstante, el rendimiento de grano de las tradicionales es bajo porque la eficiencia de la fotosíntesis (tasa fotosintética) de su dosel de follaje, durante las etapas posteriores a la floración, es baja por varias razones:
  - su dosel de follaje ensombrece bastante sus propias hojas inferiores ('autosombreado');
  - sus índices de cosecha (o sea, la relación proporcional entre la biomasa del órgano de interés comercial y la del resto de la planta) son bajos porque tienen deficiencias en la traslocación de sus nutrientes; y
  - estas deficiencias se deben a un volcamiento prematuro de las plantas (Murty, 1978).

- Las diferencias en fotosíntesis foliar entre una variedad y otra pueden atribuirse a la resistencia a la *carboxilación*, que está regulada por la actividad de la enzima responsable de la incorporación del CO_2 ambiental, conocida comúnmente como Rubisco (Ishii, 1993). Las variedades de arroz cuyo índice de eficiencia fotosintética es alto presentan, generalmente, una foto-respiración más intensa porque la enzima RuBp (ribulosa bifosfato) hace, en un mismo sitio activo, la carboxilación y la oxigenación.
- Puesto que, en muchas áreas de Colombia en que se cultiva tradicionalmente el arroz, la intensidad de la luz es baja durante la época lluviosa, es necesario desarrollar variedades de arroz que

tengan, en condiciones de baja luminosidad, las siguientes características:

- altas tasas de eficiencia fotosintética y pocas pérdidas por respiración;
- alto contenido de clorofila; y
- mayor producción de materia seca, para que se acumulen buenas reservas para la floración y se obtenga un índice de cosecha alto (Murty, 1989).

Tasa de crecimiento del cultivo (TCC)
Es un índice de la eficiencia con que un cultivo produce *biomasa vegetal* en el campo. Es, por tanto, un índice de *productividad agronómica* que se aplica sólo a plantas que crecen juntas, ya sea en parcelas de investigación o en comunidades derivadas de una siembra programada. La TCC relaciona la ganancia en masa seca de una comunidad de plantas con el área de suelo que ésta ocupa y con el tiempo, o sea, es una masa seca producida por unidad de área y por unidad de tiempo.

Las unidades son, generalmente, g/cm por día o también t/ha por año. Esta tasa se expresa así:

$$TCC = \frac{1}{As} * \frac{W_2 - W_1}{T_2 - T_1}$$

Aunque se incremente el IAF, la eficiencia fotosintética disminuye porque aumenta la sombra que cae sobre el follaje inferior (sombreamiento) y porque, al mismo tiempo, la respiración se incrementa. El IAF que corresponda a la máxima TCC se considera óptimo y debe tenerse en cuenta para establecer poblaciones óptimas de arroz, sin olvidar, obviamente, otras variables involucradas, como el porcentaje de emergencia de plántulas y el desarrollo morfofisiológico de la variedad.

Si se admite que la fotosíntesis total se incrementa asintóticamente y que la respiración (respecto al ciclo *total* de cultivo) lo hace más o menos linealmente, se ha reportado un IAF óptimo para el arroz entre 4 y 7 (Yoshida, 1983). Ahora bien, la máxima intercepción de luz ocurre a un IAF de 6 a 8 y el incremento de área foliar se asocia, hasta esos valores, con un incremento lineal en el rendimiento (Matsushima, 1976). Un cultivo de arroz que tenga una población alta y haya sido fertilizado con un alto nivel de nitrógeno puede lograr un IAF alto (10 o más); no obstante, este IAF tendría un efecto negativo en el rendimiento porque la respiración no es función lineal sino hiperbólica del IAF; por tanto, la fotosíntesis neta o la producción de materia seca permanecerían constantes aunque el IAF llegue a 10 (Yoshida, 1983).

Además de los ya mencionados, hay otros índices que sirven para medir la eficiencia en el crecimiento de las plantas, tales como el índice de cosecha (IC, ver antes), la duración del área foliar, es decir, el tiempo de permanencia del área foliar efectiva para fungir como órgano exportador de asimilados, y otros. El investigador puede escoger la tasa (o las tasas) que mejor expresen el comportamiento que desea medir en la planta o en el cultivo.

Procesos y factores en la producción de materia seca

Fotosíntesis

La fotosíntesis es la fuente primaria de materia seca, es decir, produce (dada cierta combinación de condiciones climáticas) la biomasa total que incluye el rendimiento de grano. La fotosíntesis de un cultivo depende de *muchos factores*, entre ellos los siguientes (Murty, 1977):

- la relación entre el área foliar y el área de suelo cubierta por ese follaje (IAF);
- el grado de fotosíntesis potencial por unidad de área foliar;
- el porcentaje (o relación proporcional) de luz transmitida a las hojas más bajas de las plantas respecto al total de luz recibida sobre el pabellón foliar (índice de transmisión lumínica); y
- la duración del área foliar.

El crecimiento de una planta depende, en gran medida, de la relación (o balance) entre su fotosíntesis y su respiración; si esta relación es buena, se genera la energía necesaria para la producción de materia seca. La reducción de la respiración en los órganos de la planta no está directamente relacionada con el crecimiento.

Si los tallos o la panícula crecen bien y si aumenta el índice de masa foliar (masa de las hojas respecto a la masa total de la planta) durante la floración, se obtendrá un *balance muy favorable* entre *fotosíntesis y respiración* y, en consecuencia, la producción de materia seca será mayor que cuando no se cumplen esas condiciones (Sharma y Singh, 1999).

La producción total de materia seca es más baja en las condiciones ambientales de los trópicos que en las de las zonas templadas; la razón es que el balance entre fotosíntesis y respiración es menos favorable para la planta cuando la *temperatura* es alta (Yoshida, 1983). En la zona templada de China, Japón, Australia y Estados Unidos, donde las temperaturas bajas permiten que todos los estados de crecimiento, particularmente el llenado del grano, tengan mayor duración, se han obtenido rendimientos de arroz más altos que en las regiones tropicales de Asia, donde las temperaturas altas aumentan las pérdidas por respiración y disminuyen el período de llenado del grano (Sharma y Singh, 1999). Sin embargo, dado que en las regiones tropicales la duración del ciclo de cultivo del arroz es menor y es posible lograr de tres a cuatro cosechas por año, el *rendimiento anual* de arroz es más alto que en las zonas templadas donde sólo se obtiene una sola cosecha al año (Yoshida y Parao, 1976).

Carbohidratos sintetizados y rendimiento de grano

Los carbohidratos producidos por la fotosíntesis, tanto en la fase de prefloración como en la de posfloración, contribuyen al rendimiento de grano. Esa contribución depende del ciclo de vida de la variedad, del nivel de fertilización, del método de cultivo y de las condiciones ambientales (Yoshida, 1983).

- Las variedades de larga duración utilizan las *reservas fotosintéticas* de la *prefloración* más eficientemente que las variedades de corta duración. En los trópicos se acumulan en las macollas del 10% al 15% de los carbohidratos durante la época seca del año (Sharma y Singh, 1999). En las zonas templadas, en cambio, el total de carbohidratos acumulados en las macollas suele estar entre el 30% y el 40%, a causa, probablemente, de la mayor radiación solar y de las temperaturas nocturnas más bajas (15 °C vs. 25 °C) con respecto a los trópicos. Las reservas fotosintéticas de la prefloración sostienen la formación de los granos y estabilizan el rendimiento, especialmente en condiciones de estrés, tales como una luminosidad baja, la escasez de agua, o la incidencia de insectos dañinos y de enfermedades.
- Los fotosintatos producidos en la *posfloración* hacen una gran

contribución al rendimiento de variedades cuya biomasa es baja en la prefloración y en la floración (Sharma y Singh, 1999).

Relación fotosíntesis/ fotosintatos

La producción de materia seca controla el rendimiento de grano; esa producción, a su vez, es determinada por la *habilidad de la planta* para recolectar los elementos de la fotosíntesis (CO_2, agua, radiación solar) y por la capacidad de las panículas (y espiguillas) para aceptar los fotoasimilados. La fuente de éstos es el *suplemento de asimilados*, el cual comprende los producidos antes de la floración, los almacenados en ciertas partes de la planta, y los producidos durante los estados posteriores a la floración (Sharma y Singh, 1999).

Crecimiento y desarrollo

El crecimiento se define, generalmente, como un aumento irreversible de tamaño. Cuando la planta de arroz empieza a crecer desde el cigoto, no sólo aumenta en longitud y grosor sino también en peso, en el número de sus células, en la cantidad de su protoplasma, y en la complejidad de su organismo. El crecimiento de los tejidos conduce a la diferenciación de órganos especializados, como ocurre en la floración de la planta.

En el arroz, la producción comercial y los ensayos de investigación (genéticos, de rendimiento, de fertilización, sobre ataques de insectos dañinos, sobre etiología de enfermedades, de resistencia a la sequía, de adaptación a la inundación y al agua profunda, y sobre prácticas agronómicas) tienen relación con una o más etapas del crecimiento y del desarrollo de la planta y del cultivo. El conocimiento de la forma en que crece y se desarrolla el cultivo es esencial para el investigador y el productor de arroz, porque les facilita la aplicación de las técnicas agronómicas. El manejo que haga una zona arrocera de estos conocimientos, sobre todo enfocados al medio ambiente, le permitirá obtener una mejor producción de arroz tanto en cantidad como en calidad.

El crecimiento de la planta de arroz es un proceso fisiológico continuo que se extiende, completando un ciclo, desde la germinación de la semilla hasta la maduración del grano. La planta comienza como una célula única, el cigoto, que crece y se desarrolla hasta llegar a ser un organismo multicelular. Hay una síntesis continua de moléculas más pequeñas, que son la materia prima del crecimiento. Hay división celular, que produce células nuevas, muchas de las cuales llegan a ser más grandes y más complejas que las originales. Pues bien, este proceso de especialización celular se conoce como crecimiento, ya que la diferenciación de las células permite formar tejidos, órganos y organismos. Este proceso de crecimiento presenta un patrón en el tiempo que, aunque es común a la especie, puede variar ligeramente según ciertas características genéticas de la planta o según el influjo del ambiente.

En la planta de arroz, la producción de masa seca es el resultado neto del balance entre dos procesos metabólicos básicos: fotosíntesis y respiración. La materia seca se produce en el proceso fotosintético, los productos de la fotosíntesis se acumulan y luego se distribuyen a los diferentes órganos de la planta (CIAT, 1988). La tasa de crecimiento absoluto (TCA) se eleva cuando se incrementa el peso de las hojas, y lo hace con la rapidez con que aumenta el área foliar; en efecto, al aumentar el área de intercepción de luz

y, por consiguiente, la fotosíntesis (Clavijo, 1989), los fotoasimilados se acumulan primero y luego se traslocan desde la parte aérea a toda la planta, incluyendo la raíz.

Los resultados aquí presentados provienen de los trabajos de investigación hechos en tres municipios arroceros del departamento de Córdoba (Colombia). Se hicieron en las condiciones agroclimáticas del Valle del Sinú y sembrando las parcelas mediante el sistema de trasplante. El objetivo central de la investigación fue determinar las fases del crecimiento y las etapas del desarrollo de tres materiales de arroz. Se aplicó la escala BBCH propuesta por Meier.

La escala extendida BBCH es el resultado de un grupo de trabajo conformado por las siguientes organizaciones alemanas: el Centro Federal de Investigaciones Biológicas para Agricultura y Silvicultura (BBA), el Instituto Federal de Variedades (BSA), la Asociación Alemana de Agroquímicos (IVA) y el Instituto para la Horticultura y la Floricultura (IGZ), en Grossbeeren/Erfurt. La escala representa un sistema de codificación uniforme para la identificación fenológica de los estadios de crecimiento de todas las especies de plantas monocotiledóneas y dicotiledóneas.

Fases del crecimiento

Fase vegetativa

Extensión: Empieza con la germinación de la semilla y termina en la iniciación de la panícula.

Raíces. Cuando las semillas germinan en un terreno bien aireado, la raíz seminal emerge primero del embrión; esta raíz es de corta duración. Las raíces funcionales de la planta de arroz son las raíces adventicias que se originan en los entrenudos basales de los tallos; estas raíces deben absorber el agua y los nutrientes necesarios para mantener viva la planta. En cada planta, la abundancia de raíces depende del número de nudos disponibles en el tallo, y por eso se habla del número de raíces por planta. La profundidad que alcanzan las raíces en el suelo depende de las condiciones del suelo durante el crecimiento de la planta.

La disponibilidad de nutrientes en el suelo también modifica la morfología de las raíces. Según Ángela Hodge (2004), las raíces de arroz que se desarrollan en parches de suelo ricos en nutrientes son más ramificadas, aunque más cortas, que las que se desarrollan en un suelo cuyo contenido de nutrientes es bajo.

Macollas. La producción de macollas de una planta está controlada por factores genéticos (Li et al., 2003) y por varios factores ambientales, entre los que se destacan la distancia respecto a otras plantas, la radiación solar y la disponibilidad de los elementos nutritivos del suelo.

Aparentemente, la principal función del macollamiento en los cultivos comerciales es llenar los espacios dejados por las pérdidas de población durante el establecimiento del cultivo, con el objetivo de que se forme el número máximo de panículas (supervivencia del individuo y de la población) que permitan las condiciones de crecimiento. Es posible que esta razón de tipo ecológico no haya permitido definir claramente la relación entre el macollamiento y la productividad de un cultivo de arroz de siembra directa. Algunos investigadores, sin embargo, hallaron una relación positiva entre el macollamiento y el rendimiento (Wu et al., 1998). Los estudios hechos en el IRRI tampoco mostraron una tendencia definida entre el macollamiento y el rendimiento en los

genotipos comerciales desarrollados en ese instituto entre 1966 y 1995 (Peng et al., 1999).

En los últimos años, los fitomejoradores de arroz que han acogido la selección según el tipo de planta, consideran el vigor de las raíces, la baja capacidad de macollamiento y un número bajo de macollas inefectivas entre las características útiles que permiten seleccionar materiales de alto rendimiento (Peng et al., 1999).

Hojas. Las técnicas de análisis del crecimiento relacionan la producción de material vegetal con la utilización de la luz solar; para hacerlo, miden directamente el aparato fotosintético por medio del índice de área foliar (IAF), es decir, relacionando el área de tejido fotosintético con el área de terreno ocupada por ese tejido (la relación es adimensional). Este parámetro ha sido empleado por los fitomejoradores de arroz para comparar genotipos y es de uso frecuente en los modelos de simulación. Kiniry et al. (2001) hallaron una relación lineal entre la producción de materia seca y la radiación solar fotosintéticamente activa que es interceptada por un manto foliar cuyo IAF va de 9.8 a 12.7.

La nutrición mineral es uno de los factores que afecta el desarrollo y el funcionamiento de las hojas. El suministro adecuado de nitrógeno (N), fósforo (P), potasio (K) y agua a la planta es esencial para que ésta logre el tamaño, la duración y el funcionamiento óptimos de las hojas. El N incrementa más que otros nutrientes el área foliar, pero hay que aplicarlo con cuidado para no exceder los valores críticos del IAF (Anten et al., 1995; Yin et al., 2003). Hay que tener en cuenta, además, que el N aplicado en época en que no es oportuno hacerlo puede aumentar la producción de biomasa sin aumentar el rendimiento de grano. Se ha observado también que la duración del área foliar es mayor cuando hay mucho N disponible para la planta al iniciarse la formación de la panícula.

Fase reproductiva

Extensión: Empieza en la iniciación de la panícula y termina en el inicio de la floración.

Panícula. La energía que requiere el desarrollo de la panícula es alta, razón por la cual los fotoasimilados disponibles deben ser abundantes en esta fase. Una tasa alta de acumulación de materia seca durante la fase reproductiva favorece la producción de espiguillas. De otro lado, una tasa alta de crecimiento del cultivo (TCC) en la segunda mitad de la fase reproductiva es crítica para el rendimiento de grano, porque evitará la degeneración de las espiguillas ya formadas (Horie, 2001).

Boonjung y Fukai (1996) encontraron que las deficiencias de humedad durante el desarrollo de la panícula retardan la antesis (o sea, la apertura floral y la duración de las flores) y reducen notablemente el número de espiguillas por panícula. Investigadores japoneses informaron a finales de los 80 que el estado de meiosis durante el desarrollo de las anteras es muy sensible al estrés causado por la sequía, lo que llevaría a la infertilidad del polen.

Fase de madurez fisiológica

Extensión: Empieza en el inicio de la floración y termina en la madurez fisiológica del grano.

Granos. Se reportó también en Japón que el embrión está completamente desarrollado de 10 a 12 días después de la fecundación. Contando desde el momento de la fecundación, el grano

alcanza su longitud máxima a los 6 días, su anchura máxima a los 15 días, y su grosor máximo a los 20 días; el punto más alto (pico) en la curva de peso fresco vs. tiempo lo alcanza el grano también a los 20 días. Entre los 10 y los 20 días después de la fecundación aumenta el peso del grano, y cuando llega a la madurez completa ocurre solamente un pequeño incremento en peso seco. El aumento de peso del grano se debe casi completamente al almidón sintetizado en el endospermo a partir de los carbohidratos solubles producidos en las hojas durante esta fase, los cuales fluyen hacia el ovario por los tejidos conductores.

Energía. La actividad fotosintética depende de caracteres de los genotipos y de condiciones del ambiente. Si la radiación solar es baja en la fase de madurez, se limita el rendimiento de las plantas porque, siendo escasa la energía, se reducen las tasas de producción de materia seca. Los genotipos que tienen alta capacidad de producción de materia seca son los más afectados por la falta de radiación solar. Peng et al. (1999) señalan que los genotipos modernos tienen tasas de crecimiento del cultivo (TCC) más altas en la fase de maduración que los cultivares antiguos, por lo cual su producción de biomasa y su rendimiento son más altos. Zhang y Kokubun (2004) compararon en Japón genotipos de arroz liberados antes y después de 1960 y encontraron que el aumento del rendimiento en los cultivares modernos iba acompañado de tasas de fotosíntesis neta más altas durante la maduración que en fases anteriores.

Índice de cosecha. La característica que más ha contribuido a aumentar el potencial de rendimiento de los cultivos de arroz es la capacidad de sus plantas de destinar al rendimiento agronómico una fracción de la producción de materia seca proporcionalmente mayor que otros cultivos; de este modo, la planta reduce la cantidad de fotoasimilados que debe invertir en estructuras vegetativas (Evans, 1994). La relación entre la biomasa de los órganos cosechables (rendimiento agronómico) y la biomasa total (rendimiento biológico) se denomina índice de cosecha (IC). Laza et al. (2003) compararon el rendimiento y los caracteres relacionados con él en cuatro grupos de genotipos de arroz, y encontraron una asociación estrecha entre el rendimiento de grano y el IC. Kiniry et al. (2001) obtuvieron también información que señala al IC como el carácter que más se asocia con la diferencia de rendimiento entre los cultivares; consideran, por tanto, que el IC es un carácter crítico en la selección de genotipos de alto rendimiento.

Cuando la temperatura es mayor que la óptima para el crecimiento del arroz, puede reducirse el rendimiento porque se acorta el período de llenado y se reduce el IC (Polley, 2002). Kobata y Uemuki (2004) indican que los bajos rendimientos resultantes de exponer las plantas a temperaturas altas durante el llenado del grano se deben a que el aumento de la tasa de acumulación no compensa el déficit causado por la menor duración del llenado. El acortamiento del período de llenado por las altas temperaturas está asociado con la aceleración del envejecimiento de las hojas.

Etapas del desarrollo

Las etapas del desarrollo de la planta de arroz se identifican muy fácilmente y en ellas ocurren cambios fisiológicos de gran importancia para el ciclo de vida de la planta. Estas etapas se describen a continuación mediante la escala BBCH. El desarrollo de todas las variedades tempranas, como IR 36 y Colombia 21, se caracteriza porque tienen el mismo

número máximo de hijos, y porque en ellas las etapas de iniciación de la panícula y de elongación del tallo coinciden sustancialmente. En las variedades tardías, generalmente, estas etapas se traslapan.

De la germinación a la emergencia (Etapa 00)
Esta etapa va de la siembra a la aparición de la primera hoja a través del coleóptilo.

Después de sembrar la semilla seca y de taparla, se hace un 'moje' de germinación e incubación por períodos de 24 horas. Durante los mojes de germinación, las semillas absorben agua, se hinchan e inician el metabolismo de sus reservas de almidón y de proteína, dando así comienzo al crecimiento del embrión. El proceso de germinación se dilata más o menos según la humedad del medio y la profundidad a que se ha sembrado la semilla. La tasa de respiración suele ser alta durante esta etapa.

Cuando se siembra semilla pregerminada y si la temperatura media es de 26 °C, la emergencia ocurre de 2 a 3 días después de la siembra. La primera hoja, que siempre carece de lámina, rompe el coleóptilo y se hace visible sobre la superficie del suelo.

Código 00. Semilla seca (la cariópside).
Código 01. Primera hidratación de la semilla.
Código 02. La semilla comienza a absorber agua.
Código 03. Absorción completa de agua por la semilla.
Código 04. La semilla se incuba.
Código 05. Emergencia de la radícula, que se observa a los 3 días de la germinación.
Código 06. Elongación de la radícula y formación de los pelos de la raíz.
Código 07. El coleóptilo emerge de la cariópside. En medio anaeróbico, esto ocurre en el código 05.
Código 08. Empieza a hacerse notoria la primera hoja imperfecta.
Código 09. Emergencia de la primera hoja imperfecta (no se observa su lámina).

Todo este proceso demoró 4 días en los tres materiales ensayados. Cuando se siembra semilla seca en suelo seco, la germinación puede tardar hasta 10 días, lo que depende de la temperatura del suelo, de la humedad del medio, y de la profundidad a que esté la semilla.

Estado de plántula y desarrollo de las hojas (Etapa 10)
Esta etapa va desde la emergencia hasta justo antes de que la plántula empiece a macollar.

Desde su comienzo, la plántula de arroz depende totalmente de la energía, de las proteínas y de los minerales de la semilla. Se ha demostrado también que entre el séptimo y el octavo día de su vida, la plántula empieza a fotosintetizar los compuestos energéticos que necesita y a absorber nutrientes. A partir de ese momento se considera independiente de la semilla y su materia seca se incrementa a un ritmo muy rápido.

Código 10. La punta de la primera hoja se hace visible a los 5 días después de la emergencia (DDE).
Código 11. La primera hoja se desarrollada totalmente.
Código 12. La segunda hoja se hace visible.
Código 13. La segunda hoja se desarrolla a los 8 DDE.
Código 14. La tercera hoja empieza a nacer, aproximadamente, a los 12 DDE. A los 14 días

de emergida la plántula, muere la primera hoja.

Código 17. La cuarta hoja se hace notoria, aproximadamente, a los 16 DDE.

Código 18. La cuarta hoja se desarrolla completamente.

Código 19. La quinta hoja se hace visible a los 20 DDE.

Se recomienda trasplantar las plántulas de arroz cuando tengan de tres a cinco hojas totalmente desarrolladas, situación que se presenta entre 15 y 25 DDE. Si la variedad es tardía y de desarrollo lento, se recomienda trasplantar entre 25 y 45 DDE. Es muy importante que el trasplante se haga en esta etapa inicial de la planta y antes del inicio del macollamiento, para que éste empiece cuando la planta esté ya en su sitio definitivo.

Macollamiento (Etapa 20)

Esta etapa comienza con la aparición del primer hijo o macolla y termina cuando la planta desarrolla un número máximo de hijos.

Código 20. Después del trasplante, la planta sufre estrés durante 7 días, aproximadamente.

Código 21. Al comenzar esta etapa no se observa aún el inicio de la macolla.

Código 22. Aparece una macolla (primer hijo), y se cuentan ya cerca de 25 DDE.

Código 23. Se observa el segundo hijo primario a los 30 DDE.

Código 25. Se observa el tercer hijo primario a los 35 DDE

Código 26. Se observa el tercer hijo primario y un hijo secundario a los 40 DDE.

Código 27. A los 45 DDE se observan el segundo y el tercer hijo secundarios.

Código 28. Se observa el cuarto hijo primario a los 45 DDE.

Código 29. En los materiales tempranos, a los 50 DDE, se observa el cuarto hijo primario y el cuarto hijo secundario. En Miramono y en las variedades medianamente tempranas se observan seis hijos primarios, seis hijos secundarios y tres hijos terciarios a los 60 DDE.

Cuando las variedades ensayadas llegaron al máximo macollamiento, se habían desarrollado 11 hojas en dos materiales precoces, de las cuales murieron seis. En las plantas de Miramono nacieron 12 hojas de las cuales murieron 6. En los materiales precoces, el máximo macollamiento se alcanza después de la diferenciación del primordio.

Elongación del tallo (Etapa 30)

Esta etapa empieza cuando el cuarto entrenudo del tallo principal, situado debajo de la panícula, comienza a hacerse notorio por su longitud, y termina cuando ese entrenudo está totalmente elongado (o cuando empieza la siguiente etapa).

Código 31. Es notorio el crecimiento del cuarto entrenudo del tallo principal que se encuentra debajo de la panícula.

Código 32. El cuarto entrenudo del tallo principal continúa su elongación (o alargamiento).

Código 33. Se inicia el primordio floral.

Código 34. Continúa elongándose el cuarto entrenudo. La panícula mide 2 mm de largo.

Código 35. La hoja número 11 emerge totalmente. En este punto se observan ocho hojas en el tallo principal.

Código 36. El primordio de la panícula continúa creciendo.

Código 37. El 70% del cuarto entrenudo se ha elongado.
Código 38. El 80% del cuarto entrenudo se ha alongado en esta etapa.
Código 39. El cuarto entrenudo está totalmente desarrollado o elongado. Esta elongación coincide con el desarrollo de la panícula.

En las variedades semienanas de arroz, que son fotoinsensibles y tempranas, el cuarto entrenudo del tallo (debajo de la panícula) se alarga (elongación) de 1 a 3 cm antes de que la panícula sea visible. Inmediatamente después de percibida visualmente la iniciación de la panícula, se observa también que el entrenudo continúa su elongación en forma rápida, hasta que la panícula (la inflorescencia) haya emergido completamente sobre la hoja bandera.

Embuchamiento (Etapa 40)
Esta etapa empieza cuando la panícula ya diferenciada es visible, y termina cuando el extremo de las florecillas está justamente debajo del cuello de la hoja bandera.

Fernández et al. (1985) encontraron que, en las variedades tempranas, la panícula se desarrolla mientras ocurre la elongación del tallo. Cuando la panícula tiene 5 cm de longitud, comienza a diferenciarse en su morfología final.

Código 41. Se observa una ligera hinchazón en la parte superior del tallo.
Código 42. La panícula, que crece dentro de la vaina de la hoja bandera, continúa su crecimiento.
Código 43. La vaina de la hoja bandera empieza a abultarse.
Código 44. El abultamiento (o engrosamiento) de la vaina de la hoja bandera es notorio.
Código 45. Continúa el abultamiento bajo la vaina de la hoja bandera.
Código 46. El 'embuchamiento' es ya notorio.
Código 47. Se pueden observar algunos granos dentro de la vaina de la hoja bandera. En este punto, el arroz se encuentra en 'estado de preñez'.
Código 48. Se observan plenamente los granos dentro de la vaina de la hoja bandera.
Código 49. La panícula está a punto de salir de la vaina de la hoja bandera. Se alcanza a observar la hoja número 12. Cinco hojas han muerto al final de esta etapa.

Floración (Etapa 50)
Esta etapa comienza cuando la panícula sale de la vaina de la hoja bandera.

Código 51. Empieza a emerger la panícula de la vaina de la hoja bandera. Las anteras son de color blanco.
Código 52. El 15% de la panícula ha emergido. Se abren las flores del tercio superior de la panícula.
Código 53. El 30% de la panícula ha emergido. Hay antesis, es decir, apertura floral y polinización en el tercio superior de la panícula.
Código 54. El 40% de la panícula ha emergido. Se abren las flores del tercio medio de la panícula.
Código 55. El 50% de la panícula ha emergido.
Código 56. En este punto, el 60% de la panícula ha emergido.
Código 57. Hay antesis en el tercio medio de la panícula.

Código 58. El 80% de la panícula ha emergido.

Código 59. Se completa la antesis en toda la panícula, proceso que tarda de 4 a 7 días. En esta etapa sólo hay cinco hojas en la variedad Miramono y cuatro hojas en otras variedades.

El arroz trasplantado emplea hasta 10 días para completar la floración y la fecundación de todas las florecillas, porque las plantas desarrollan un número de macollas mayor que las del arroz de siembra directa. En este último caso, hay menos macollas pero la floración es más pareja. Al final de esta etapa, la planta deja de aumentar en altura.

Polinización y antesis (Etapa 60)

En esta etapa, las anteras empiezan a derramar el polen y éste inicia la fecundación de las espiguillas, una vez depositado en los estigmas.

Código 61. Las anteras del ápice de la panícula son visibles.

Código 62. El 20% de las anteras empieza a derramar polen.

Código 63. El 30%, aproximadamente, de las anteras se encuentran en antesis.

Código 64. El 40% de las anteras encuentran en antesis.

Código 65. El 50% de las anteras está en antesis.

Código 66. El 60% de las anteras está en antesis.

Código 66. El 60%, aproximadamente, de las espiguillas está derramando polen.

Código 67. El 70% de las espiguillas está polinizado.

Código 68. El 80% de las espiguillas está polinizado.

Código 69. Las espiguillas están todas polinizadas al finalizar esta etapa.

Grano lechoso (Etapa 70)

Esta etapa va del inicio de la antesis y la fecundación del ovario hasta que el contenido de los granos sea un líquido lechoso blanco.

Código 71. Los granos del ápice de la panícula empiezan a mostrar un contenido líquido.

Código 72. El líquido de esos granos es de apariencia lechosa.

Código 73. De 4 a 5 días después de la fertilización, las espiguillas del tercio superior de la panícula se llenan del líquido lechoso.

Código 74. El tercio medio de la panícula se llena del líquido lechoso.

Código 75. El 50% de los granos está lleno del líquido lechoso.

Código 76. El 60% de los granos está lleno del líquido lechoso.

Código 77. La panícula está totalmente llena del líquido lechoso.

Código 78. La panícula empieza a doblarse por el peso de los granos.

Código 79. Los granos toman un color verde, y el tercio superior de la panícula empieza a doblarse por el peso de los granos hasta describir un arco de 90º (respecto a su posición inicial). En este punto hay solamente tres hojas en el tallo principal de la planta.

Grano pastoso (Etapa 80)

En esta etapa, el contenido del grano empieza como un líquido lechoso blanco, y su consistencia se hace gradualmente pastosa suave, hasta que el grano se endurece. El color de la pasta se torna amarillo verdoso.

Código 81. La consistencia del grano cambia a pastosa suave en el ápice de la panícula.

Código 82. El grano continúa de color verde.
Código 83. El grano empieza a endurecerse (consistencia dura).
Código 84. Los granos de la parte intermedia de la panícula siguen adquiriendo consistencia pastosa.
Código 85. El color del grano empieza a cambiar al verde amarillento (verdoso).
Código 86. Los granos empiezan a mostrar un contenido sólido.
Código 87. La panícula dobla su punta en un arco de 180° y las ramificaciones de la mitad superior del raquis se doblan en un arco de 90° en su punta, a causa del incremento de peso de los granos.
Código 88. En este punto, todos los granos tienen consistencia pastosa.
Código 89. En las variedades tempranas, la hoja número 12 se marchita y sólo dos hojas permanecen en cada macolla. En esta etapa, la planta alcanza su máximo peso de materia seca.

Madurez fisiológica (Etapa 90)
Cuando el arroz se ha plantado en el trópico cálido, la planta llega a esta madurez aproximadamente 30 días después de la floración.

Código 91. El 10% de los granos toma un color amarillo pajizo, empezando por los del ápice de la panícula.
Código 92. El 40 % de los granos toma un color amarillo pajizo.
Código 93. El 30% de los granos toma un color amarillo pajizo.
Código 94. El 40% de los granos de cada panícula madura.
Código 95. El 50% de los granos de cada panícula madura.
Código 96. El 60% de los granos de cada panícula madura.
Código 97. El 70% de los granos llega a su estado de madurez.
Código 98. El 80% de los granos de cada panícula está totalmente maduro.
Código 99. El total (100%) de los granos está fisiológicamente maduro.

Esta condición ocurre a los 30 días después de la floración, cuando la panícula, por el peso de los granos, se encuentra a 180°, colgando del tallo. La hoja anterior y la hoja bandera permanecen verdes en algunas variedades o toman un color verde pálido en otras. Los granos que no han llenado conservan su color verde.

Referencias bibliográficas

Alvarez, M.; Casanova, M. 2001. Análisis de crecimiento y desarrollo de cuatro genotipos de arroz sembrados en diferentes períodos en la región del Caribe húmedo. Trabajo de grado (Ing. Agrón.). Facultad de Ciencias Agrícolas, Universidad de Córdoba, Montería, Colombia. p. 34-46.

Anten, N.P.R.; Schieving, F.; Medina, E.; Werger, M.J.A.; Schuffelen, P. 1995. Optimal leaf area indices in C3 and C4 mono- and dicotyledonous species at low and high nitrogen availability. Physiologia Plantarum 95(4):541-550.

Ascencio, J.; Fargas, J. 1973. Análisis del crecimiento del fríjol (*Phaseolus vulgaris* L., var. Turrialba 4) cultivado en solución nutritiva. Turrialba 23(4):420-428.

Boonjung, H.; Fukai, S. 1996. Effects of soil water deficit at different growth stages on rice growth and yield under upland conditions. 2. Phenology, biomass production and yield. Field Crops Research 48(1):47-55.

Buelvas, M.; Romero, L. 2000. Respuesta de la variedad de arroz Fedearroz 50 a cinco niveles de fertilización nitrogenada bajo riego, en la zona de Montería. Trabajo de grado (Ing. Agrón.). Facultad de Ciencias Agrícolas, Universidad de Córdoba, Montería, Colombia. 77 p.

Charry, R. 2001. Comportamiento de la variedad de arroz Fedearroz 50 con diferentes métodos de siembra bajo riego, en la zona de Montería. Trabajo de grado (Ing. Agrón.) Facultad de Ciencias Agrícolas, Universidad de Córdoba, Montería, Colombia. p. 22.

CIAT (Centro Internacional de Agricultura Tropical). 1988. Conceptos básicos de fisiología del fríjol. Manual audiotutorial. Contenido científico: Jeffrey White; producción: Clemencia Gómez y Carlos Valencia. Serie 04SB-07.01. Cali, Colombia. 54 p.

Clavijo, J. 1989. Análisis del crecimiento en malezas. Revista Comalfi 16: 12-16.

Collins, W.B. 1977. Analysis of growth in Kennebec. American Potato Journal 54:33-40.

Coombs, J. 1988. Técnicas de fotosíntesis y bioproductividad. Colegio de Posgraduados, Chapingo, México y Editorial Futura, México DF. p. 258-266.

Degiovanni, V. 1999. Investigaciones sobre el cultivo del arroz en el Caribe húmedo. Primer Seminario Técnico. Fedearroz y Facultad de Ciencias Agropecuarias de la Universidad de Córdoba, Montería, Colombia. 55 p.

Degiovanni, V. 2003. Análisis del crecimiento, del desarrollo y de los componentes del rendimiento de tres genotipos de arroz en el Valle del Sinú. Trabajo para optar el grado de Magíster en Ciencias Agrarias con énfasis en Fisiología de Cultivos. Convenio Universidad Nacional y Universidad de Córdoba. Universidad Nacional de Colombia, Bogotá DC. 22 p.

Egli, D.; Legett, J. 1976. Rate of dry matter accumulation in soybean seeds with varying source–sink ratios. Agronomy Journal 68:371-374.

Evans, L.T. 1994. Crop physiology: Prospects for the retrospective science. In: Boote, K.J.; Bennett, J.M.; Sinclair, T.R.; Paulsen, G.M. (eds.). Physiology and determination of crop yield. p. 19-35.

Fernández, F. 1978. Etapas de desarrollo de la planta de arroz para propósitos de evaluación y adiestramiento en el IRRI. Seminario interno, serie SE-16-78. Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), Cali, Colombia. 10 p.

Fernández, F.; Vergara, B.S.; Yapit, N.; García, O. 1985. Crecimiento y etapas de desarrollo de la planta de arroz. In: Tascón, E.; García, E. (eds.). Arroz: Investigación y producción. Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT) y Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD), Cali, Colombia. p. 83-101.

Galindo, L.; Pineda, L. 2001. Análisis de los efectos climáticos sobre la estabilidad fenotípica de cuatro variedades comerciales de arroz en el Caribe húmedo. Trabajo de grado (Ing. Agrón.). Facultad de Ciencias Agrícolas, Universidad de Córdoba, Montería, Colombia. 65 p.

Guerra, H.; Olave, J. 2002. Ganancia genética por rendimiento de grano en el arroz del Caribe húmedo. Trabajo de grado (Ing. Agrón.). Facultad de Ciencias Agrícolas, Universidad de Córdoba, Montería, Colombia. p. 24-28.

Hodge, A. 2004. The plastic plant: Root responses to heterogeneous supplies of nutrients. New Phytologist 162(1):9-24.

Horie, T. 2001. Increasing yield potential in irrigated rice: Breaking the yield barrier. In: Peng S.; Hardy, B. (eds.). Rice research for food security and poverty alleviation. International Rice Research Institute (IRRI), Los Baños, Filipinas. 692 p.

Hoyos, B.; de la Espriella, J. 2000. Efecto de la radiación solar y de la temperatura en el rendimiento de cuatro genotipos de arroz bajo riego y con diferentes épocas de siembra, en la región del Magdalena Medio. Trabajo de grado (Ing. Agrón.). Facultad de Ciencias Agrícolas, Universidad de Córdoba, Montería, Colombia. p. 35-55.

Ishii, R. 1993. Leaf photosynthesis in rice in relation to grain yield. In: Abrol, Y.P. (ed.). Photosynthesis: Photoreactions to plant productivity. Kluwer, Dordrecht, Holanda. p. 561-569.

Jarma, O.A. 2005. Cinética del crecimiento. Escuela de Posgrado, Facultad de Agronomía, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá DC. 12 p. (Mimeografiado)

Jarma, O.A.; Buitrago, C.; Gutiérrez, S. 1999. Respuesta del crecimiento de la habichuela (*Phaseolus vulgaris* L. var. Blue Lake) a tres niveles de radiación incidente. Revista Comalfi 26:62-73.

Kebede, H.; Johnson, R.C.; Carver, B.F.; Ferris, D.M. 1992. Physiological and anatomical features of two *Triticum dicoccoides* wheat accessions differing in photosynthetic rate. Crop Science 32:138-143.

Kiniry, J.R.; McCauley, G.; Xie, Y.; Arnold, J.G. 2001. Rice parameters describing crop performance of four U.S. cultivars. Agronomy Journal 93:1354-1361.

Kobata, T.; Uemuki, N. 2004. High temperatures during the grain filling period do not reduce the potential grain dry matter increase of rice. Agronomy Journal 96:406-414.

Laza, M.R.C.; Peng, S.; Akita, S.; Saka, H. 2003. Contribution of biomass partitioning and translocation to grain yield under sub-optimum growing conditions in irrigated rice. Plant Production Science 6:28-35.

Leopold, A.; Kriedman, P. 1975. Plant growth and development. 1a. ed. McGraw Hill, Nueva York. 365 p.

Li, X.; Quian, Q.; Fu, Z.; Wang, Y.; Xion, G.; Zeng, D.; Wang, X.; Liu, X.; Teng, S.; Hiroshi, F.; Yuans, M.; Luo, D.; Hant, B.; Li, J. 2003. Control of tillering in rice. Nature 422:618- 621.

Matsushima, S. 1976. High yielding rice cultivation. University of Tokyo Press, Tokyo. p. 125-130.

Moore, T.C. 1979. Biochemistry and physiology of plant hormones. Springier Verlag, Nueva York. 274 p.

Murty, K.S. 1977. Physiological aspects of production in rice. In: Padhi, B. (ed.). Frontiers of plant sciences. Utkal University, Bhubaneswar, India. p. 79-86.

Murty, K.S. 1989. Physiological research on rice and future perspectives. In: Saxena, H.K.; Srivastava, R.D.L. (eds.). Plant physiology research: Imperatives for the nineties. Memorias de un simposio nacional. C. S. Azad University Agriculture and Technology, Kanpur, India. p. 1-9.

Murty, K.S.; Venkateswarlu, B. 1978. Physiological constraints on growth and development in rice during khari season. In: Increasing rice yield in Kharif. Memorias de un simposio internacional. Central Rice Research Institute, Cuttack, India. p. 45-65.

Nagamine, I. 1990. Genetic diversity and inheritance of photosynthetic activity of rice (*Oryza sativa* L.) detected by oxygen evolution in leaves. Japan Agricultural Research Quarterly 23:249-254.

Peng, S.; Huang, J.; Sheehy, J.E.; Laza, Rebecca C.; Vísperas, R.M.; Zhong, X.; Centeno, Grace S.; Khush, G.S.; Cassman, K.G. 1999. Rice yields decline with higher night temperature from global warming. PNAS 101(27):9971-9975.

Polley, H.W. 2002. Implications of atmospheric and climatic change for crop yield and water use efficiency. Crop Science 42:131-140.

Ramos, R.; Santos, M. 1995. Estudio de la relación fuente–demanda fisiológica en el maíz, de participación de la raíz y el tallo en el rendimiento, de desarrollo de la planta y de producción de grano. Trabajo de grado (Ing. Agrón.). Facultad de Ciencias Agrícolas, Universidad de Córdoba, Montería, Colombia. 107 p.

Sharma, A.; Singh, R. 1999. Rice: Crop yield, physiology and processes. Central Rice Research Institute, División de Agronomía y División de Ciencia del Suelo y Microbiología (Cuttack, India). In: Smith, D.L.; Hamel, C. (eds.). Springer Verlag, Heidelberg, Alemania. p. 109-139.

Uwe, M. 2001. Estadios de las plantas monocotiledóneas y dicotiledóneas BBCH. Monografía. Centro Federal de Investigaciones Biológicas para Agricultura y Silvicultura 2. p. 150.

Vargas, J.P. 1985. El arroz y su medio ambiente. In: Tascón, E.; García, E. (eds.). Arroz: Investigación y producción. Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT) y Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD), Cali, Colombia. p. 19-35.

Wu, G.; Wilson, L.T.; McClung, A.M. 1998. Contribution of rice tillers to dry matter accumulation and yield. Agronomy Journal 90(3):317-323.

Yin, X.; Lantinga, E.A.; Schapendonk, A.C.M.; Zhong, X. 2003. Some quantitative relationships between leaf area index and canopy nitrogen content and distribution. Annals of Botany 91:893-903.

Yoshida, S. 1983. Rice. In: Potential productivity of field crops under different environments. Memorias de un simposio. International Rice Research Institute (IRRI), Manila, Filipinas. p. 103-127.

Yoshida, S.; Parao, F.T. 1976. Climatic influence on yield and yield components of lowland rice in the tropics. In: International Rice Research Institute (IRRI). Climate and rice. Memorias de un simposio. Manila, Filipinas. p. 471-491.

Zhang, W.; Kokubun, M. 2004. Historical changes in grain yield and photosynthetic rate of rice cultivars released in the 20th century in Tohoku region. Plant Production Science 7:36-44.

Capítulo 6

El arroz y su medio ambiente

José Patricio Vargas

Contenido

	Página
Resumen	83
Abstract	83
Introducción	84
Factores climáticos que más afectan el arroz	84
Temperatura	84
Radiación solar	91
Agua	94
Viento	96
Humedad relativa	96
Referencias bibliográficas	97

Resumen

Se analizan los distintos factores ambientales que influyen en la producción de grano del cultivo de arroz. Entre ellos están la temperatura (alta, baja crítica, del agua y del aire), la radiación solar, la energía solar y la fotosíntesis; el agua, la precipitación, la transpiración, la relación agua/suelo, el viento y la humedad relativa. En síntesis, la respuesta de la planta de arroz a los factores del clima y a diversas condiciones del ambiente determina, en gran medida, la velocidad y la intensidad de los procesos metabólicos controlados por el código genético de la planta. Cuanto mejor se expresen esos procesos, más altos serán los niveles de producción y productividad que alcancen las plantas para responder por el resultado económico del cultivo.

Abstract

Rice and its environment

The different environmental factors that influence rice production are analyzed, including: temperature (high, critical low, water, and air); solar radiation; solar energy and photosynthesis; water; precipitation; transpiration; water/soil ratio; wind; and relative humidity. In brief, the response of the rice plant to diverse climatic factors and environmental conditions determines, to a great extent, the speed and intensity of metabolic processes controlled by the plant's genetic code. The better these processes are expressed, the higher the production level and productivity of plants in terms of economic performance.

Introducción

El arroz es un alimento básico en la dieta de más de la mitad de la población mundial. El arroz se cultiva en condiciones ambientales tan diversas que ha suscitado, a su vez, una diversidad de criterios entre los investigadores y especialistas de este cereal. Algunos autores sostienen que es un cultivo especial de las zonas húmedas del trópico o de los climas de temperatura alta; otros informan que florece en diversas condiciones ambientales entre los 45° de latitud norte y los 40° de latitud sur respecto al ecuador. Se ha informado también que el arroz puede cultivarse desde el nivel del mar hasta los 2500 metros de altitud, una extensión que le permite crecer en áreas donde la temperatura, la longitud del día y la disponibilidad del agua son muy diversas.

El análisis de los factores que regulan el crecimiento de la planta de arroz ha revelado a los investigadores las *limitantes* relacionadas con el desarrollo del arroz y con su adaptabilidad al medio que lo rodea.

En las zonas tropical y subtropical de baja altitud, las *temperaturas* media y extrema son, prácticamente, las adecuadas para este cultivo; ahora bien, la temperatura disminuye con la altitud y esta condición puede convertirse en los trópicos en una limitante para el cultivo del arroz, en dos situaciones: cuando se suaviza la temperatura al principio y al final de la temporada de cultivo, y cuando existe la posibilidad de un descenso de temperatura durante el período vegetativo de la planta.

Los valores medios mensuales de la temperatura y de la duración del día durante el período de crecimiento del arroz permiten hacer una valoración aproximada de la *evapotranspiración* de las plantas de arroz durante este mismo período; por consiguiente, permiten conocer la necesidad absoluta de agua del cultivo para compensar por esa evapotranspiración.

En esta sección se analizarán separadamente los distintos factores ambientales que influyen en la producción de grano del cultivo de arroz.

Factores climáticos que más afectan el arroz

Temperatura

La temperatura afecta el crecimiento y el desarrollo de la planta de arroz. Durante las distintas fases del desarrollo, la planta no responde a iguales rangos de temperatura; podría decirse que hay un rango favorable para cada fase. Los fitomejoradores desarrollan variedades que pueden adaptarse bien a diferentes rangos de temperatura para que puedan expresar libremente su potencial genético, no sólo en rendimiento sino también respecto a su respuesta a las plagas y enfermedades que limitan el cultivo.

Temperaturas bajas

El efecto de las temperaturas bajas (incluyendo la de congelación del agua) en la planta de arroz se ha estudiado bien; por ejemplo, los cambios bioquímicos ocurridos en ella entre 0 y 4 °C están bien determinados. Los resultados de este estudio permiten planear adecuadamente una explotación arrocera; sin embargo, la bioquímica de la planta en el rango de 10 a 21 °C no ha sido bien estudiada.

Las *plántulas* de arroz expuestas a temperaturas bajas pueden sufrir un estancamiento en su crecimiento porque se retardan o cesan sus reacciones químicas y sus procesos físicos; no obstante, el fenómeno puede revertirse y

la planta se recupera cuando la temperatura del medio es favorable. Las hojas que se formen durante el tiempo de exposición a la temperatura baja experimentan una elongación.

Las *plantas* más desarrolladas expuestas a temperaturas bajas pueden sufrir un daño irreversible o un colapso de sus funciones —y, en ocasiones, la muerte. Son ejemplos, respectivamente, las plantas que sufren un vaneamiento total de los granos, y las que mueren a consecuencia del intenso amarillamiento de las hojas— debido, posiblemente, a la impotencia de las raíces para absorber los nutrientes del suelo helado.

Las temperaturas bajas (de 15 a 19 °C) que afectan las plantas durante el estado de meiosis de las células madre del polen, o sea, de 10 a 11 días antes de la *floración*, causan una alta esterilidad en las plantas (Satake, 1969).

Temperaturas altas

Nakayama (1974) considera el efecto de la temperatura alta como un factor adverso a la producción de arroz, inclusive en algunas regiones frías de Japón. La combinación de temperaturas altas y baja radiación solar durante la *maduración del grano* acorta esa etapa y es una causa importante de los rendimientos bajos.

En condiciones controladas, Moriya y Nara (1971) observaron un alto porcentaje de esterilidad y de granos parcialmente llenos cuando las plantas de arroz fueron expuestas durante la floración a una temperatura promedio de 31.5 °C (máxima de 36 °C y mínima de 27 °C). Resultados similares obtuvieron Sato et al. (1973) y Kusanagi y Washio (1973) en experimentos en que la temperatura máxima oscilaba entre 35 y 30 °C y la mínima entre 35 y 25 °C.

Temperaturas críticas

Las temperaturas extremas causan serias perturbaciones en el desarrollo de la planta de arroz y, por ello, no favorecen el ambiente en que puede completarse el ciclo de vida de la planta. Las temperaturas críticas para la planta de arroz están, generalmente, por debajo de 20 °C y por encima de 30 °C, y varían según el estado de desarrollo de la planta. Varían también según la variedad de arroz, la duración del efecto de esa temperatura, el cambio de condiciones diurnas a nocturnas, y el estado fisiológico de la planta. El Cuadro 1 muestra la variación de la temperatura crítica frente a las distintas fases de desarrollo de la planta.

Cuando se somete la planta a una temperatura inferior a 20 °C durante el estado de reducción en la división de las células madre del polen, se induce en los granos un alto porcentaje de *esterilidad* (Satake, 1969). Sin embargo, temperaturas de 12 °C (y un poco menores) no causarán esa esterilidad si el tiempo de exposición a ellas no sobrepasa los 2 días, pero causarán hasta un 100% de esterilidad si la exposición se prolonga durante 6 días.

La esterilidad debida a las temperaturas bajas se atribuye, generalmente, al efecto de la *temperatura nocturna*, porque la temperatura diurna alta puede contrarrestar el efecto de la temperatura baja de la noche. Este fenómeno se demostró cuando se expusieron plantas de arroz en estado de reducción celular a una temperatura constante de 14 °C, de día y de noche, durante 9 días: la esterilidad registrada en los granos fue de 41%; en cambio, cuando las plantas pasaron de la temperatura nocturna de 14 °C a una diurna de 26 °C, el porcentaje de esterilidad se redujo a 12%.

Estudios realizados por Matsushima (1976) indicaron que, en el período de

Cuadro 1. Correspondencia entre las principales etapas de desarrollo de la planta de arroz y las diversas temperaturas (crítica y óptima) que pueden afectar esas etapas.

Etapas de desarrollo	Temperatura crítica (°C)[a]		Temperatura óptima (°C)[a]
	Baja	Alta	
Germinación	10	45	20–35
Emergencia y establecimiento de las plántulas	12–13	35	25–30
Enraizamiento	16	35	25–28
Elongación de las hojas	7–12	45	31
Macollamiento	9–16	33	25–31
Iniciación de la panícula (primordio floral)	15		
Diferenciación de la panícula	15–20	38	
Antesis (floración)	22	35	30–33
Maduración	12–18	30	20–25

a. Medida como temperatura media diaria, excepto para la germinación.
Tomado de Yoshida (1977).

desarrollo anterior a la floración, la temperatura óptima diurna era de 31 a 32 °C, mientras que la óptima nocturna variaba entre 21 y 22 °C. En cambio, para un período de desarrollo 15 días después de la floración, dicha temperatura era de 29 °C en el día y 19 °C en la noche. Finalmente, para el período de desarrollo 30 días después de la floración, esas temperaturas eran de 26 °C en el día y 16 °C en la noche.

El mismo autor concluyó que el rango de temperaturas durante la etapa de maduración del grano no era, necesariamente, el rango de temperaturas óptimas del día y de la noche, y que la maduración del grano estaba fuertemente influenciada por la temperatura nocturna. Esta conclusión se sustenta en dos hechos: por un lado, la pérdida de carbohidratos debida a la respiración de la planta aumenta cuando la temperatura nocturna es alta y, por otro lado, la temperatura nocturna baja afecta otras actividades fisiológicas. En otras palabras, las temperaturas nocturnas muy altas o muy bajas no favorecen la maduración del grano y hay, ciertamente, una temperatura óptima para esta maduración.

Efectos en el crecimiento y en el rendimiento de la planta

Las temperaturas críticas altas pueden afectar el rendimiento de la planta porque tienen influencia en el macollamiento, en la formación de las espiguillas y en la maduración de éstas, efectos que varían también según la variedad.

Experimentos realizados por Yoshida (1973) demuestran que la *tasa de crecimiento* de la planta de arroz aumenta linealmente con la temperatura, en el rango de 22 a 31 ºC (Figura 1). Durante el período inicial de crecimiento, la temperatura afecta muy levemente el macollamiento y la tasa de crecimiento relativo, excepto la temperatura más baja estudiada en los experimentos (22 ºC).

El mismo autor encontró que el efecto de la temperatura en el *macollamiento* está regulado por el nivel de radiación solar. Sus resultados indican básicamente que, a temperatura alta,

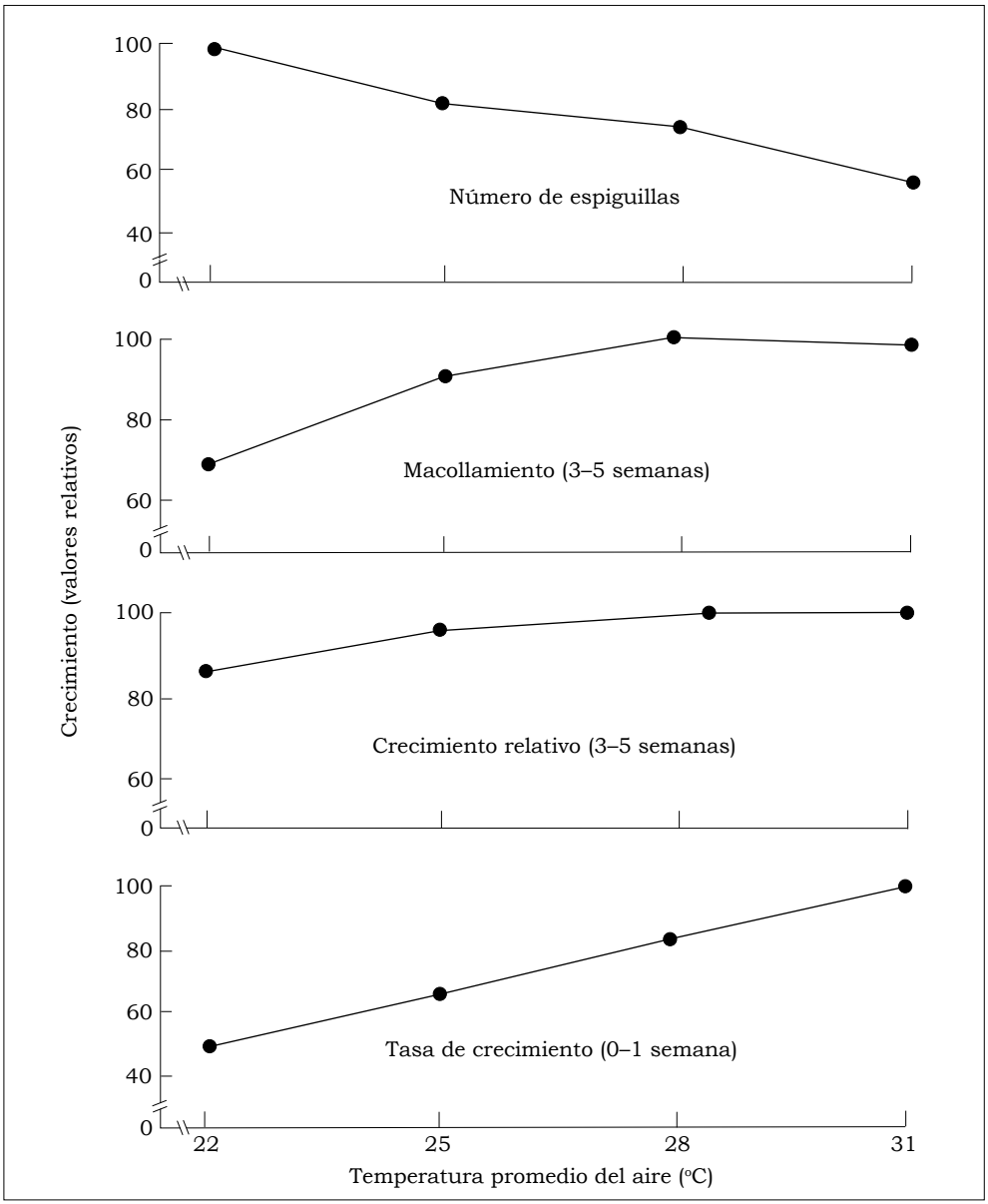


Figura 1. Efecto de la temperatura en varios aspectos del crecimiento de la variedad IR8, en condiciones controladas. (Tomada de Yoshida, 1973.)

aumenta la tasa de emergencia de hojas y aparecen más yemas (de macollas) que las producidas a menor temperatura; cuando la iluminación es baja, algunas de las yemas no se desarrollan hasta convertirse en macollas, porque faltan los carbohidratos necesarios para su crecimiento.

El mismo experimento mostró que, durante la fase reproductiva de la planta, el número de *espiguillas* por

planta aumentó cuando disminuyó la temperatura; esto indica que, a diferencia del resultado anterior, la temperatura óptima cambia de alta a baja a medida que avanza el crecimiento de la planta, es decir, de la fase vegetativa a la reproductiva.

La temperatura media óptima para la *maduración* de las variedades japónicas está en un rango de 20 a 22 °C, según varios informes (Matsushima y Tsunoda, 1957; Matsushima et al., 1957; Airni et al., 1959). Los resultados de los experimentos de Murata en 1976 mostraron que el peso de 1000 granos de una misma variedad varía de 24 a 21 g cuando la planta se expone, durante 21 días a partir de la floración, a un cambio de temperatura de 22 a 28 °C (Figura 2).

En el trópico, una temperatura diurna de 29 °C, en promedio, no resulta muy perjudicial (respecto a la producción de macollas y granos) cuando hay suficiente radiación solar. Por eso, las variedades de tipo índica se adaptan mejor a las temperaturas altas, mientras que las de tipo japónica necesitan temperaturas bajas para lograr una adecuada madurez del grano. Yoshida y Hara (1977) encontraron, en experimentos hechos bajo condiciones controladas, que la temperatura diaria promedio que requiere el llenado del grano del arroz de tipo índica (Fujisaka 5) está entre 20 y 27 °C, mientras que la requerida por el arroz de tipo japónica (IR20) está entre 16 y 25 °C (Figura 3).

Temperatura del agua y del aire

La temperatura afecta directamente el desarrollo de la planta de arroz que se cultive en condiciones de inundación y bajo láminas de agua de diferente espesor. La intensidad de ese efecto depende de la posición de los *puntos de crecimiento* de la planta respecto a la superficie del agua (Tsunoda y Matsushima, 1962). Desde los primeros estados de crecimiento hasta la iniciación de la panícula, las yemas responsables de las hojas, las macollas y la panícula permanecen bajo el agua; su

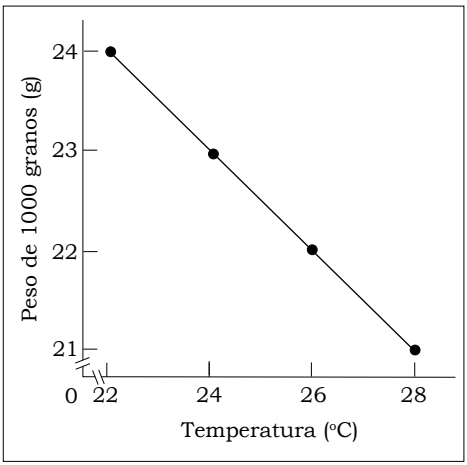


Figura 2. Efecto de la temperatura en el peso de 1000 granos de arroz en la etapa de maduración de la planta (21 días después de la floración). (Tomada de Murata, 1976.)

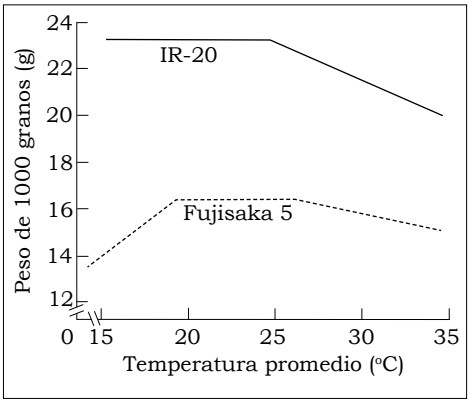


Figura 3. Relación entre el peso de 1000 granos de arroz y la temperatura promedio en que ocurre la etapa de llenado del grano en dos variedades de arroz (promedio de tres experimentos). (Adaptada de Yoshida y Hara, 1977.)

desarrollo, por tanto, recibe el influjo de la temperatura del agua. Ahora bien, el crecimiento y la elongación de toda la planta reciben la influencia de dos temperaturas, la del agua y la del aire, dado que el ciclo de vida se desarrolla, principalmente, en un medio aéreo.

A medida que la panícula se desarrolla y sobresale del nivel del agua, la influencia de la temperatura del agua en el crecimiento y en la madurez de la panícula disminuye, y estos fenómenos empiezan a depender cada vez más de la temperatura del aire (Tsunoda y Matsushima, 1962; Matsushima et al., 1964). Se puede concluir, por tanto, que el efecto de las temperaturas del aire y del agua varía según el estado de crecimiento de la planta. De este modo, como indican Matsushima et al. (1964), durante los estados iniciales del desarrollo de la planta la temperatura del agua afecta el *rendimiento* porque influye en el número de panículas por planta, en el número de granos por panícula, y en el porcentaje de granos maduros que se pueden obtener. En estados más avanzados del desarrollo, la temperatura del aire puede afectar el rendimiento, porque influye directamente en el porcentaje de granos llenos y en su peso.

El efecto de la temperatura del agua depende de la magnitud de ésta y de la profundidad de la lámina aplicada. En la mayoría de los casos, la temperatura del agua es mayor que la del aire; a medida que aumenta la profundidad de la lámina de agua, el crecimiento de la panícula depende más de la temperatura del aire. Cuando la planta se encuentra en el estado de reducción celular (en la división de las células del polen), y si la temperatura del aire desciende por debajo de su nivel critico, se puede proteger la planta contra la *esterilidad* causada por esa temperatura baja aumentando la profundidad del agua hasta 15 ó 20 cm (Nishiyama et al., 1969).

Estrés causado por temperaturas bajas

Según su estado de desarrollo, la planta puede sufrir daños cuando la temperatura desciende cada día, en promedio, por debajo de 20 °C. Este *daño por frío* puede ocurrir no sólo en las zonas templadas, sino en el trópico y en el subtrópico durante las noches de la época seca o de verano. Los daños causados por el frío a los cultivos de arroz se han reportado en Australia, Bangladesh, China, Colombia, Corea, Cuba, Estados Unidos de América, India, Indonesia, Irán, Japón, Nepal, Pakistán, Perú, Sri Lanka, en la antigua Unión Soviética y en otros países. Los principales daños observados son los siguientes:

> la semilla no germina, la emergencia de la plántula se retrasa, y aparecen las siguientes condiciones negativas: enanismo, amarillamiento de las hojas, esterilidad apical, emergencia parcial de la panícula, retraso en la floración, alto porcentaje de granos vanos y maduración no uniforme (Yoshida, 1978).

Los estudios realizados por Sasaki y Wada (1973) indican que la máxima susceptibilidad del arroz a las temperaturas bajas ocurre durante la época del 'embuchamiento', es decir, de 14 a 17 días antes de la emergencia de la panícula; después de esta época, la 'floración' es la etapa en que el arroz es muy susceptible al frío. No obstante, Shibata et al. (1970) encontró que la planta de arroz sometida a una temperatura baja durante 3 días era más sensible al frío en la floración, y que esa sensibilidad era igual, o incluso mayor, que la manifestada en el 'embuchamiento'.

Estrés causado por temperaturas altas

Cuando la temperatura sobrepasa los 35 °C, en la antesis del arroz, y esta exposición al calor pasa de 1 hora, se observa en las plantas un alto porcentaje de esterilidad. Yoshida (1978) informa que las plantas de arroz expuestas a

temperaturas superiores a 35 °C sufren daños que dependen de su estado de desarrollo. Por ejemplo, durante la fase vegetativa se observan los siguientes síntomas: la punta blanca de la hoja, las bandas cloróticas, una reducción del macollamiento y una disminución de la altura de la planta. Durante la fase reproductiva aparecen síntomas como la panícula blanca, una reducción del número de granos y una mayor esterilidad; en la etapa de maduración se reduce el número de granos llenos por panícula.

El mismo autor concluye que el estado de desarrollo del arroz más sensible a las temperaturas altas es la floración; siguen a ésta los 9 días anteriores a la salida de la panícula en la etapa de 'embuchamiento'. Durante la antesis, 1 ó 2 horas de temperatura alta aumenta definitivamente el porcentaje de esterilidad.

Interacción entre la temperatura y el suministro de nutrientes

En la mayoría de los casos, lo que determina el rendimiento es el número de granos por unidad de área. Yoshida (1978) informa que existe una alta correlación positiva entre el número de granos por unidad de área y el total de nitrógeno tomado por la planta al momento de la floración. Él observó que el *número de granos* era mayor a medida que aumentaba la cantidad de nitrógeno (N) suministrado. Por otro lado, en un ensayo similar realizado bajo condiciones controladas, se encontró que el número de granos aumentaba a medida que la temperatura disminuía bajo un determinado nivel de N, siendo más evidente este resultado cuando el nivel de N era más alto. Sin embargo, la eficiencia del N para producir granos llegaba a su nivel máximo cuando la temperatura y el nivel de N eran los más bajos (Cuadro 2).

Los experimentos realizados por Sasaki et al. (1973) demostraron que el N puede hacer variar el porcentaje de esterilidad que causan las temperaturas bajas cuando las células reproductivas se hallan en la etapa de reducción de la división celular. Cuando la temperatura baja está por encima, o muy por debajo, de la temperatura crítica, el suministro de N tiene muy poco efecto en la esterilidad; en cambio, cuando la temperatura es moderada (16 °C), el porcentaje de esterilidad aumenta si hay un incremento en el nivel del N aplicado. Otros experimentos reportados por Sasaki y Wada (1975) indican que los efectos negativos de una alta dosis de N aplicada durante la fase reproductiva,

Cuadro 2. Efecto de la temperatura en el número de granos y en la eficiencia del nitrógeno (N) para producir granos.

Temperatura diurna/ nocturna (°C)	Granos/m^2 (no.)[a]			Granos/mg de N absorbido (no.)[a]		
	50 N	100 N	150 N	50 N	100 N	150 N
35/27	24.400	28.800	27.800	2.9	2.0	1.4
32/24	27.500	30.800	29.900	3.0	2.2	1.6
29/21	28.800	31.300	37.600	3.3	2.3	2.1
26/18	32.600	40.900	48.200	3.2	2.5	2.2

a. N = kg/ha de N aplicados al suelo.

Tomado de IRRI (1979).

cuando la temperatura es baja, puede contrarrestarse con un aumento del nivel del fósforo aplicado (Figura 4).

Radiación solar

La mayor parte de la energía radiante proveniente del sol tiene una longitud de onda comprendida entre 0.3 y 3.0 micras (o unidad μ = 1 millonésima parte del metro) y por ello se considera, generalmente, como radiación de onda corta. La tierra emite, por su parte, una radiación de onda larga que mide de 3 a 50 micrones.

El tejido verde de las hojas utiliza en la fotosíntesis la energía solar cuya longitud de onda tenga de 0.4 a 0.7 micrones;

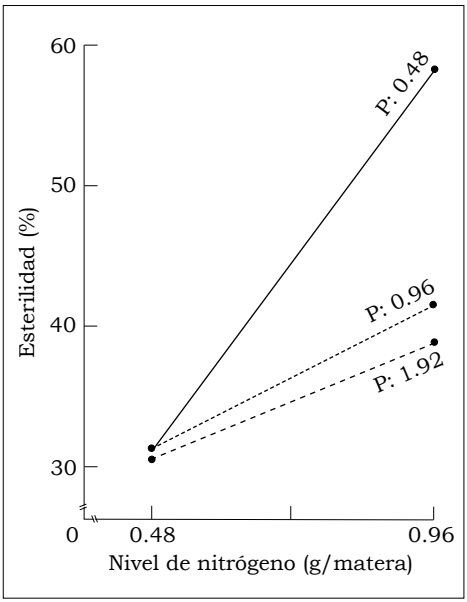


Figura 4. Efecto de la aplicación de fósforo (P_2O_5) en el porcentaje de esterilidad causado por las temperaturas bajas durante la etapa de reducción de la división de las células reproductivas (Sasaki y Wada, 1975).

esta energía se denomina en biología 'radiación fotosintética activa' (PAR, del inglés) o, simplemente, radiación solar o luz solar. El total de radiación solar es de 0.50 micrones, aproximadamente, tanto en la zona intertropical (el trópico) como en la zona templada (Monteith, 1972).

La unidad de radiación solar que ha resultado más útil para la agricultura es la cal/cm^2 por día, aunque un buen número de físicos y científicos emplean otras unidades. Yoshida (1978) observó que la radiación solar media en 26 sitios de 15 países arroceros variaba, por ejemplo, de 50 cal/cm^2 por día en Milán (Italia) a 700 cal/cm^2 por día o más (en junio–julio) en Lisboa (Portugal) y en Davis (California, EE.UU.). Sin embargo, la mayoría de los sitios mencionados por Yoshida recibe, en promedio, 300 cal/cm^2 por día o un poco más durante el período de maduración del arroz.

Radiación solar durante el desarrollo del arroz

La radiación solar requerida para el cultivo del arroz varía según los diferentes estados de desarrollo de la planta. Una radiación solar baja afecta muy ligeramente los rendimientos y sus componentes durante la fase vegetativa, mientras que en la fase reproductiva causa una notoria disminución en el número de granos. Por otra parte, durante el período que va del llenado del grano a su maduración, baja drásticamente el rendimiento de la planta cuando se reduce (si se presenta un nivel bajo de radiación solar) el porcentaje de granos llenos.

Una relación cuantitativa entre el rendimiento y la radiación solar se puede observar en el Cuadro 3, elaborado por Yoshida y Parao (1976). El cuadro muestra que la radiación solar influye mucho en el rendimiento durante la fase reproductiva de la planta; influye también, aunque menos, en la fase de

Cuadro 3. Efecto del descenso de la radiación solar (medida en tres fases del desarrollo de la planta) en el rendimiento y en los componentes del rendimiento de la variedad de arroz IR-747B2–6.

Luz solar (%)	Rendimiento (kg/ha)	Granos (no./m^2)	Granos llenos (%)	Índice de cosecha	Peso de 1000 granos (g)
		En fase vegetativa			
100	7110	4160	88.9	0.49	20.0
75	6940	4060	89.9	0.48	19.9
50	6350	3830	89.5	0.51	19.9
25	6300	3810	84.3	0.51	19.8
		En fase reproductiva			
100	7110	4160	88.9	0.49	20.0
75	5710	3030	87.8	0.47	20.3
50	4450	2440	89.4	0.40	19.5
25	3210	1650	89.4	0.36	19.1
		En fase de maduración			
100	7110	4160	88.9	0.49	20.0
75	6530	4110	81.1	0.49	20.0
50	5160	4060	64.5	0.44	19.5
25	3930	4170	54.9	0.38	19.1

Tomado de Yoshida y Parao (1976).

maduración, y tiene muy poco efecto durante la fase vegetativa (Figura 5).

Partiendo de muchas investigaciones realizadas en diferentes años, se ha concluido que la radiación solar influye en el rendimiento de la planta de arroz, principalmente durante la etapa de maduración del grano, ya que ejerce un notorio efecto en el número de granos llenos de la panícula. Esta conclusión permite afirmar que la traslocación de carbohidratos al grano de arroz ocurre principalmente durante el día, y que alrededor de ¾ del total de los carbohidratos producidos por la planta se elaboran en el día. Bonner y Galston (1952) encontraron que, en general, la traslocación de carbohidratos desde la hoja hacia otros tejidos es inducida por el proceso fotosintético de acumulación específica de azúcar en la lámina foliar. Se puede afirmar entonces que la radiación solar es necesaria no solamente para la asimilación del carbono, sino también para desempeñar un papel importante en la traslocación al grano de los carbohidratos cuya síntesis sigue a la asimilación.

En la Figura 6 se observa que el porcentaje de *granos llenos* aumenta con la intensidad de la luz hasta un valor de ésta de 250 cal/cm^2 por día, y que se incrementa ligeramente cuando esa intensidad es mayor (entre 300 y 450 cal/cm^2 por día). El autor de este trabajo buscó una explicación de dicho resultado y encontró (Figura 7) lo siguiente: hay una relación similar entre la tasa de asimilación del carbono y la intensidad solar, y la intensidad solar superior a 0.6 cal/cm^2 por min no tiene casi influencia en la tasa de asimilación del carbono.

De las Figuras 6 y 7 se puede deducir que la relación entre el porcentaje de granos llenos y la intensidad de la luz se puede considerar dependiente de la relación entre la tasa de asimilación de carbono y la intensidad de la luz solar.

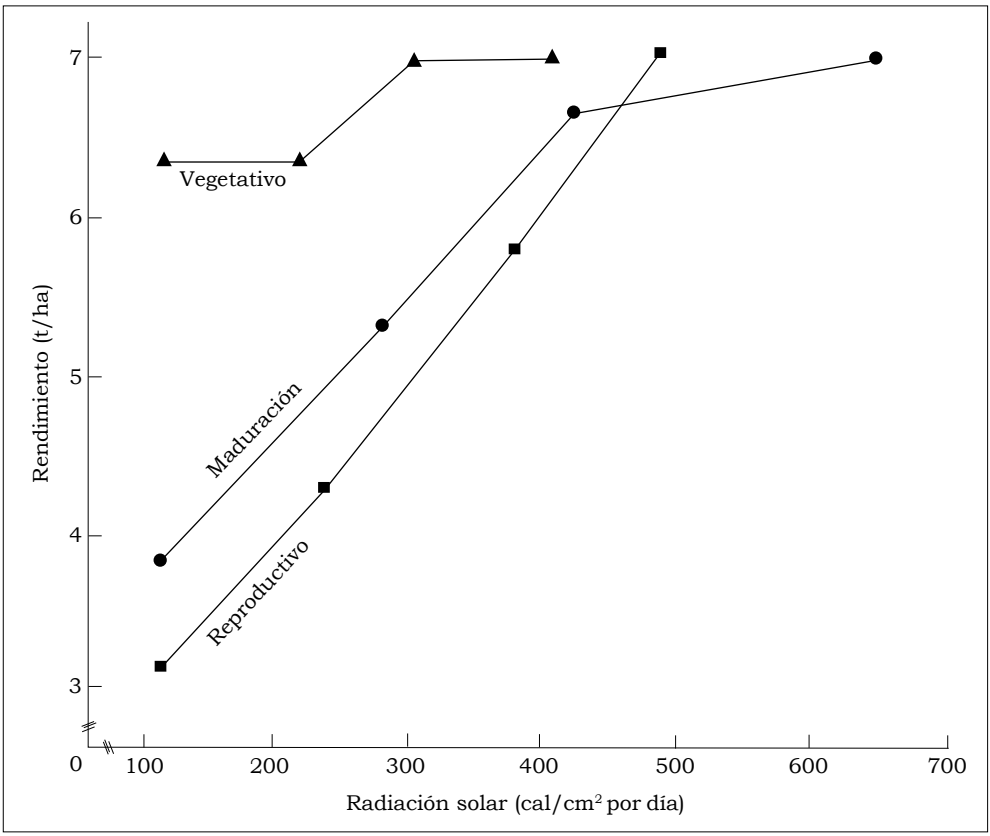


Figura 5. Efecto de la radiación solar, considerada en tres estados del crecimiento de la planta, en el rendimiento de IR–747B2–6. (Tomada de Yoshida y Parao, 1976.)

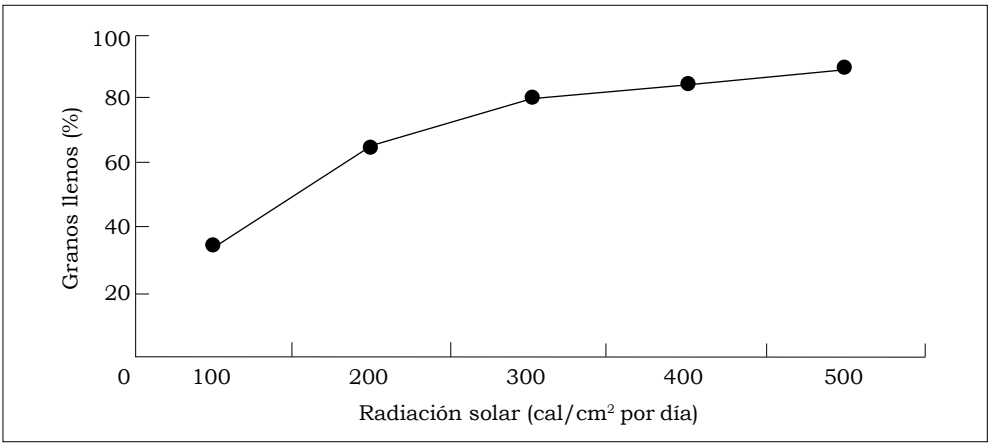


Figure 6. Efecto de la radiación solar en el porcentaje de granos llenos.

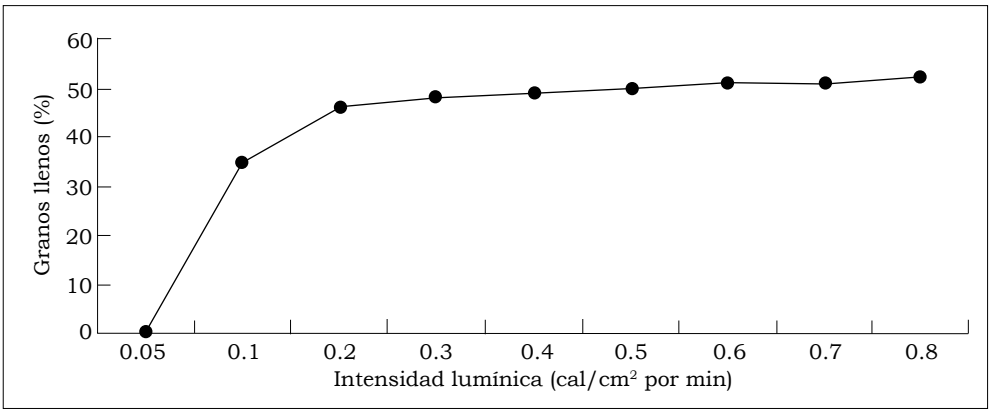


Figura 7. Relación entre la intensidad lumínica y la tasa de asimilación de carbono.

Se puede afirmar finalmente que, cuando la intensidad de la luz es baja, el porcentaje de granos llenos puede aumentar si se incrementa la luz solar; en cambio, si la intensidad de la luz supera cierto nivel establecido como crítico, el porcentaje de granos llenos no aumentará al incrementar la luz solar en la forma en que lo hizo en el caso anterior.

Energía solar y fotosíntesis

La fotosíntesis es el proceso en que la energía solar es atrapada por el tejido verde de las plantas y convertida en energía química, que es almacenada en forma de carbohidratos. De 80% a 90% (en peso) de la materia seca de las plantas verdes proviene de la fotosíntesis; el resto viene, normalmente, del suelo en los minerales absorbidos por las raíces de las plantas.

En un cultivo de arroz, la fotosíntesis depende, principalmente, de la incidencia (cantidad y ángulo) de la radiación solar, de su relación con el área foliar (tasa/unidad de área), del índice de área foliar y de la orientación de las hojas. Si la radiación solar es baja, la tasa de fotosíntesis también será baja (Tsunoda, 1972; Tsunoda et al., 1968).

Agua

El agua es indispensable para la planta de arroz. El contenido de agua de la planta varía según la estructura considerada (hoja, tallo) y el estado de desarrollo de la planta. La planta absorbe por las raíces la mayor parte del agua que necesita; emplea menos del 15% del agua absorbida y transpira el resto a través de los estomas de las hojas. El adecuado suministro de agua es uno de los factores más importantes de la producción de arroz. Muchas áreas productoras de arroz sufren por exceso de agua o por sequía, ya sea porque las lluvias son irregulares o porque falla el suministro de riego.

La principal razón para inundar un cultivo de arroz es que la mayoría de las variedades de arroz crecen mejor y dan mayor rendimiento cuando se cultivan en un suelo inundado. Esta agua cumple tres funciones esenciales:

- Modificar las características físicas de la planta.
- Cambiar las características físico-químicas y el estado nutricional y físico de los suelos.

- Controlar las malezas, alterando la naturaleza de unas y restringiendo el crecimiento de otras.

En un cultivo de arroz con riego se pierde agua por la transpiración de las plantas, por la evaporación en la superficie del agua y por percolación a través del suelo. Las pérdidas por percolación son las más variables y dependen de condiciones del suelo como la textura, la topografía y el nivel freático.

La cantidad de agua requerida por el arroz en diferentes funciones y etapas del sistema con riego se presenta en el Cuadro 4. Las cifras son promedios de un rango de valores reportado por más de 40 países cultivadores de arroz.

Precipitación

El arroz se cultiva no sólo con sistemas de riego, sino en zonas bajas con alta precipitación, en láminas de agua profunda y en condiciones de secano (lluvia estacional y suelo bien drenado). En las tierras bajas, las plantas de arroz están expuestas a daños debidos a la sumersión en los sistemas de inundación; en las zonas altas, en cambio, pueden sufrir los efectos de la sequía, que se presenta con frecuencia.

Se ha informado también que la precipitación fuerte puede agravar el volcamiento de las plantas, porque las hojas largas y cargadas de humedad son pesadas y, cuando tienden a juntarse, hacen volcar la planta (Kung, 1971).

Cuando se cultiva arroz con agua de lluvias y la temperatura está en el rango de los niveles críticos, la precipitación es el factor limitativo del desarrollo. Cuando se cultiva arroz con riego, el crecimiento y el rendimiento de las plantas están determinados, en gran parte, por la temperatura y por la radiación solar.

Transpiración

La transpiración es la pérdida de agua en forma de vapor a través de la superficie total de la planta. La planta se marchitará o morirá, a menos que se le suministre agua para sustituir la que pierde por transpiración. Este fenómeno ocurre principalmente a través de los *estomas* de las hojas y, en pequeña proporción, por la cutícula foliar y la de otros tejidos.

La pérdida de agua por transpiración está directamente relacionada con la *tasa de crecimiento absoluto* (TCA), de manera que la transpiración puede considerarse

Cuadro 4. Agua requerida por el arroz cultivado con riego.

Uso del agua	Cantidad[a]
Por pérdida en plantas (uso fisiológico) y en suelo (agua subterránea)	(mm/día)
Transpiración	1.5 – 9.8
Evaporación	1.0 – 6.2
Percolación	0.2 – 15.6
Total (pérdida por día/ha)	5.6 – 20.4
Por el agricultor (uso agronómico)	(mm/ciclo)
En semilleros	40
En preparación de tierras	200
En irrigación de lotes	1000
Total (gasto por cultivo/ha)	1240

a. Son mm de lámina de agua equivalente a la que se emplea para medir la precipitación pluvial.

Tomado de Kung (1971).

como los gramos de agua transpirada por cada gramo de materia seca producida. Esta relación varía según la humedad del suelo, el clima, la variedad, el estado de desarrollo de la planta y el momento del cultivo. Según Matsushima et al. (1964) y Yoshida (1978), esta relación está entre 250 y 350 g de agua por gramo de materia seca producida.

Relación agua/suelo

Los suelos en que puede desarrollarse el arroz son tan variados como el rango de climas a que se expone el cultivo. Su textura varía de arenosa a arcillosa; su pH oscila entre extremos de 3.0 y 10.0; su contenido de materia orgánica puede estar entre 1% y 50%; su concentración de sales entre 0 y 1%; y su disponibilidad de nutrientes puede ir desde la deficiencia notoria hasta el exceso. Dos factores determinan, en gran parte, la productividad de la tierra en que se siembra arroz: las condiciones del suelo y el agua disponible.

El arroz es la única especie comercial que se cultiva en *suelos saturados* de agua (en algunos sistemas, las plantas se mantienen sumergidas) durante una parte (o la totalidad) del ciclo de vida de las plantas; por tal razón, las propiedades físicas del suelo tienen menor importancia relativa que el suministro adecuado de agua.

La *textura del suelo* tiene un papel muy importante en el manejo del agua de riego y de la fertilización. Si la textura es fina, el tamaño pequeño de los poros del suelo sólo permite un movimiento lento del agua; en cambio, si la textura del suelo es liviana, el excesivo suministro de agua y de fertilizantes aumenta las pérdidas de ambos recursos por causa del lavado y de la percolación.

El arroz soporta bien los suelos cuyo pH esté entre 4.0 y 8.4; sin embargo, se desarrolla mejor cuando la acidez de éstos no baja del pH 5.0 ni sobrepasa el pH 6.5. El arroz tolera bastante bien la salinidad y se obtienen buenas producciones de grano en suelos salinos; estos suelos, a su vez, son *lavados* por los continuos riegos que se dan a las plantas en el sistema con riego.

Viento

El viento desempeña un papel importante en la vida de la planta de arroz. Se ha informado que, cuando el viento sopla con poca velocidad, el rendimiento de la planta aumenta gracias a la turbulencia que se crea en medio de la comunidad de plantas. En los años 70, algunos investigadores japoneses hallaron que la tasa de fotosíntesis era mayor cuando aumentaba suavemente la velocidad del viento, ya que la turbulencia incrementaba el suministro de gas carbónico (CO_2); este resultado confirmaba el obtenido en los 60 por un investigador australiano de que una velocidad del viento mayor que el rango de 0.3 a 0.9 m/seg causaba un pequeño efecto en la fotosíntesis de la planta.

Por otro lado, los vientos fuertes con características de vendaval son perjudiciales para las plantas de arroz, puesto que incrementan el fenómeno del *volcamiento*. Los vientos muy secos han causado secamiento en las hojas, que es grave para los cultivos de secano. Los vientos secos y calientes han producido laceraciones en las hojas y en los granos y, en muchos casos, han hecho abortar las flores.

Humedad relativa

La evaporación es un fenómeno inverso de la humedad relativa, que se puede definir como el vapor de agua ya contenido en el aire. Se ha demostrado

que, manteniendo los demás factores constantes, un aumento de la humedad relativa reduce la intensidad de la *evapotranspiración*, puesto que el gradiente de presión de vapor de agua entre la atmósfera y una superficie húmeda es alto. La capacidad del aire para retener vapor de agua aumenta rápidamente con la temperatura: por tanto, el aire caliente del trópico contiene más vapor de agua que el aire frío de otras zonas.

Referencias bibliográficas

Airni, R.; Sawamura, H.; Konno, S. 1959. Physiological studies on mechanisms of crop plants: Effect of the temperature upon behavior of carbohydrates and related enzymes during the ripening of the rice plant. Proceedings of the Crop Science Society of Japan 27:405-407.

Bonner, J.; Galston, A.W. 1952. Principios de fisiologia vegetal. Freeman, San Francisco, CA, EE.UU. 499 p.

IRRI (International Rice Research Institute). 1979. Annual Report 1978. Los Baños, Filipinas.

Kung, P. 1971. Irrigation agronomy in monsoon Asia. FAO. Roma, Italia.

Kusanagi, T.; Washio, O. 1973. The phytotron at Chugoku National Agricultural Experimental Station. Bulletin of the Chugoku National Agricultural Experimental Station 23:53-90.

Matsushima, S. 1976. High yielding rice cultivation. University of Tokio Press, Tokio. p. 125-130.

Matsushima, S.; Tsunoda, K. 1957. Analysis of developmental factors determining yield and its application to yield prediction and culture improvement of lowland rice. XLV: Effects of temperature and its daily range upon the growth, grain yield and its constitutional factors. Proceedings of the Crop Science Society of Japan 26:243-244.

Matsushima, S.; Manaka, K.; Tsunoda, K. 1957. Analysis of developmental factors determining yield and yield prediction and culture improvement of lowland rice. XXXIV: On the mechanism of ripening (5). On the mechanism of ripening (6). Proceedings of the Crop Science Society of Japan 26:203-206.

Matsushima, S.; Tanaka, T.; Hoshino, T. 1964. Analysis of yield determining process and its application to yield prediction and culture improvement of lowland rice. LXXI: Combined effect of air temperature and water temperature at different stages of growth on the growth and morphological characteristics of rice plants. Proceedings of the Crop Science Society of Japan 33:135-140.

Monteith, J.L. 1972. Solar radiation and productivity in tropical ecosystems. Journal of Applied Ecology 9:747-766.

Monteith, J.L. 1977. Climate. In: Alvim, P. de T.; Koziowski, T.T. (eds.). Ecophysiology of tropical crops. Academic Press, Nueva York. p. 1-27.

Moriya, M.; Nara, M. 1971. Influence of air temperature on ripening of lowland rice. In: Studies on maximizing rice yield. Research Report 49. Ministry of Agriculture, Forestry and Fisheries. p. 110-115.

Murata, Y. 1976. Productivity of rice in different climatic regions of Japan. In: Climate and rice. International Rice Research Institute (IRRI). Los Baños, Filipinas. p. 449-470.

Nakayama, H. 1974. Panicle senescence in rice plant. Bulletin of the Hokiriku National Agricultural Experimental Station 16:15:17.

Nishiyama, I.; Hayase, H.; Satake, T. 1969. Protecting effect of temperature and depth of irrigation water from sterility caused by cooling treatment at the meiotic stage of rice plants. Proceedings of the Crop Science Society of Japan 38:554-555.

Sasaki, K.; Wada, S. 1973. Varietal differences in cold tolerance at different stages of panicle development in rice. Hoku-No (Japón) 40(8):7-14.

Sasaki, K.; Wada, S. 1975. Effects of nitrogen, phosphoric acid and potash on the percentage of sterile grains in rice plants. Proceedings of the Crop Science Society of Japan 44:250-254.

Sasaki, K.; Moeda, H.; Wada, S. 1973. Effects of nitrogen and temperature on sterility at meiotic stage. Hoku-No (Japón) 40(90):1-7.

Satake, T. 1969. Research on cool injury of paddy rice plant in Japan. Japan Agricultural Research Quarterly 4(4):5-10.

Sato, K.; Inaba, K.; Tozawa, M. 1973. High temperature injury of ripening in rice plant. 1: The effects of high temperature treatments at different stages of panicle development on the ripening. Proceedings of the Crop Science Society of Japan 42-207-213.

Shibata, M.; Sasaki, K.; Shimazaki, Y. 1970. Effects of air temperature and water temperature on the percentage of sterile grains. Proceedings of the Crop Science Society of Japan 39:401-408.

Tsunoda, K. 1972. Photosynthetic efficiency in rice and wheat. In: International Rice Research Institute (IRRI). Rice breeding. Los Baños, Filipinas. p. 471-482.

Tsunoda K.; Khan, A.H. 1968. Differences among strains of rice in the photosynthetic tissues: Comparative leaf anatomy of Indica and Japonica. Tohoku Journal of Agricultural Research 19:17.

Tsunoda, K.; Matsushima, S. 1962. Analysis of yield determining process and its application to yield prediction and culture improvement of lowland rice. LXII: Effects of irrigation water temperature under different water depths on the growth, grain yield and yield components of rice. Proceedings of the Crop Science Society of Japan 31:19-22.

Yoshida, S. 1973. Effects of temperature on growth of the rice plant (*O. sativa*) in a controlled environment. Soil Science and Plant Nutrition 19:29-34.

Yoshida, S. 1977. Rice. In: Alvim, P. de T.; Kozlowski, T.T. (eds.). Ecophysiology of tropical crops. Academic Press, Nueva York. p. 57-87.

Yoshida, S. 1978. Tropical climate and its influence on rice. IRRI Research Applications Service 20.

Yoshida, S.; Hara, T. 1977. Effects of air temperature and light on grain filling of an Indica and a Japonica rice (*Oryza sativa*) under controlled environmental conditions. Soil Science and Plant Nutrition 23(1):93-107.

Yoshida, S.; Parao, F.T. 1976. Climatic influence on yield and yield components of lowland rice in the tropics. In: International Rice Research Institute (IRRI). Climate and rice. Los Baños, Filipinas. p. 471-494.

Capítulo 7

La fisiología de la planta y la productividad del cultivo

Guillermo Riveros
Nubia Stella Rodríguez

Contenido

	Página
Resumen	100
Abstract	101
Introducción	101
Crecimiento y desarrollo	101
Fase vegetativa	102
Fase reproductiva	104
Fase de maduración	105
Ajuste del cultivo al ambiente	108
A la radiación solar	109
A la temperatura	109
Al agua disponible	110
A las características del suelo	111
Fisiología y fitomejoramiento	111
Referencias bibliográficas	113

Resumen

Se analiza el funcionamiento de la planta de arroz individualmente y el de una comunidad de plantas (el cultivo), durante las diferentes etapas del crecimiento de la planta, y se relacionan los procesos fisiológicos y de crecimiento con el resultado final: el rendimiento. En la fase vegetativa se analizan el desarrollo de las raíces, el macollamiento, la inhibición o suspensión, las macollas y el rendimieno, y el manto foliar. En la fase reproductiva se analizan el número de panículas por unidad de área, y el número de espiguillas por panícula. En la fase de maduración se analizan los depósitos, los productos, las reservas y el volcamiento. Se discute la variabilidad genética para señalar los caracteres que pueden modificarse con el fin de obtener, por ejemplo, mayores rendimientos. Se señalan también los efectos del medio ambiente en el funcionamiento de la planta y del cultivo, y se indica el papel que desempeñan las prácticas agronómicas en el ajuste entre la adaptabilidad de las variedades al medio y la oferta ambiental de los sitios de producción.

Abstract

Plant physiology and crop productivity

The functioning of the rice plant during different growth stages is analyzed at the individual plant level and as a plant community (crop) and then related to physiological and growth processes that determine yields. In the vegetative phase, processes analyzed were root development, tillering, inhibition or suspension, tillers and yield, and leaf cover. In the reproductive phase, the number of panicles per unit area and the number of spikelets per panicle were analyzed. During the maturation phase, deposits, products, reserves, and lodging were analyzed. Genetic variability is discussed to indicate those traits that can be modified to obtain, for example, increased yields. The effects of the environment on the functioning of the rice plant and crop are also indicated, and the role played by agronomic practices in harmonizing the adaptability of varieties to the environment and the environmental offer of production sites is specified.

Introducción

La aplicación de las ciencias relacionadas con el suelo, las plantas y los fenómenos climáticos a la producción de cultivos ha logrado obtener, de manera eficiente, cosechas abundantes y de buena calidad. Se han desarrollado *sistemas de producción* que regulan el funcionamiento de las diferentes etapas del ciclo de vida de las plantas, bien sea mediante genotipos apropiados o con prácticas agronómicas selectivas; la aplicación de estos sistemas ha obtenido de las plantas respuestas bien definidas de crecimiento y desarrollo.

En este capítulo se analiza el *funcionamiento de la planta* de arroz individual y el de una comunidad de plantas (el cultivo), durante las diferentes etapas del crecimiento de la planta, y se relacionan los procesos fisiológicos y de crecimiento con el resultado final: el rendimiento. Se discute la variabilidad genética para señalar los caracteres que pueden modificarse con el fin de obtener, por ejemplo, mayores rendimientos. Se señalan también los efectos del medio ambiente en el funcionamiento de la planta y del cultivo, y se indica el papel que desempeñan las prácticas agronómicas en el ajuste entre la adaptabilidad de las variedades al medio y la oferta ambiental de los sitios de producción.

Se espera que la discusión de estas ideas sea útil cuando se tomen decisiones respecto al manejo apropiado que se dará al cultivo del arroz para optimizar la producción de grano. Serán útiles también estas ideas cuando se seleccionen variedades apropiadas para las condiciones ambientales específicas de cada localidad y de cada época de producción, y cuando se escojan practicas de cultivo que aseguren el uso racional de los recursos del medio y que minimicen las pérdidas de rendimiento y de rentabilidad del cultivo.

No se trata de aumentar simplemente el rendimiento, sino de aproximarse lo más posible al rendimiento potencial de las variedades, el cual no se expresa en su totalidad porque en cada etapa de su desarrollo sustraen algo de él las condiciones ambientales desfavorables y el manejo inadecuado del cultivo.

Crecimiento y desarrollo

El crecimiento y el desarrollo del arroz se llevan a cabo en tres fases, y cada fase se caracteriza porque tiene funciones definidas respecto al rendimiento de la planta y relaciones específicas con el

ambiente. Una variedad que se desarrolla en 120 días gasta alrededor de 60 días entre la emergencia de las plántulas y el comienzo de la panícula, 30 días desde la iniciación de la panícula hasta la floración o antesis, y 30 días entre la panícula emergida y la maduración de los granos.

Fase vegetativa

Las plantas de arroz tienen la capacidad de producir un *sistema de raíces* apto para tomar recursos del suelo y de producir macollas portadoras de panículas. El tallo principal y las macollas emiten hojas a intervalos regulares para formar un *manto productivo*; este follaje captura la radiación solar para sintetizar los productos necesarios con que se construirá la estructura de la planta, para proveer la energía que requiere su funcionamiento, y para almacenar las reservas alimenticias destinadas a la siguiente generación.

El tamaño del sistema de raíces y del sistema aéreo de la planta varia de un genotipo a otro, y la expresión de ese tamaño potencial es controlada por el ambiente. Asimismo, de la selección de la variedad y de la aplicación de las prácticas agronómicas adecuadas depende el establecimiento de un sistema de raíces y de un manto foliar apropiados, que puedan utilizar bien los recursos del suelo y de la atmósfera en cada situación particular. De este modo, la planta obtendrá un rendimiento *cercano al potencial* de su genotipo varietal.

Desarrollo de las raíces
En un suelo suelto y en condiciones de secano, las raíces pueden alcanzar una profundidad superior a 1 m. En los suelos inundados, esa profundidad rara vez supera los 40 cm, porque el suministro de oxígeno a los ápices de las raíces, a través del aerénquima, es limitado (Kondo et al., 2003).

Estos autores encontraron que las características de las raíces que más varían entre un genotipo y otro son el número de raíces en los nudos y el peso específico de la raíz (en g/cm); por su parte, las más afectadas por el ambiente son la longitud de la raíz por unidad de peso y el peso total de las raíces. Señalan también los autores que, dado un tipo de suelo, el *desarrollo apropiado* de las raíces en él es fundamental para obtener la máxima expresión del potencial del genotipo.

Cuando el suelo tiene suficiente aireación, los fertilizantes se aplican correctamente y se hace un control efectivo de las malezas, las plantas pueden desarrollar bien su sistema de raíces desde el inicio de su crecimiento. Las raíces así establecidas permiten sostener una demanda elevada de agua de la planta y absorber los elementos nutritivos necesarios para el desarrollo.

Macollamiento
En términos botánicos, las macollas son ramificaciones del tallo que se originan en las yemas localizadas en la base de los entrenudos no alargados, las cuales crecen independientemente del tallo madre porque forman un sistema propio de raíces adventicias. Nemoto et al. (1995) observaron que las macollas se producen siguiendo el desarrollo de las hojas del tallo principal. La primera macolla aparece, generalmente, en la axila de la hoja 2 en el momento en que hay 5 hojas expandidas en el tallo principal; este proceso continúa manteniendo la misma relación temporal.

Inhibición o suspensión. Cuando las condiciones ambientales no son favorables para el crecimiento, muchas yemas no se desarrollan después de que

se han producido dos primordios foliares (Nemoto et al., 1995). Sasaki et al. (2004) observaron que, en la medida en que aumentaba la densidad de plantas, se hacía más intensa la acción que suprime la emergencia de las macollas. Cuando los nudos inferiores no reciben una radiación solar adecuada, consistente en el balance apropiado de radiación roja lejana (730 nm) y la radiación roja (660 nm), se inhiben las yemas que darían macollas; este mecanismo opera en varias especies vegetales (Ballaré y Casal, 2000; Lafarge y Hammer, 2002).

La producción y la muerte de las macollas se relaciona, a su vez, con la tasa de crecimiento relativo, en forma tal que si la radiación solar favorece la acumulación rápida de materia seca en el vástago (parte aérea), se desarrolla un número considerable de macollas; en cambio, si esa tasa de acumulación de materia seca es inferior a un valor crítico, empiezan a morir las macollas (Dingkuhn et al., 1991). Asimismo, toda condición que limite la tasa de fotosíntesis (como la radiación solar escasa) limitará también el desarrollo de las macollas.

Macollas y rendimiento. Es posible que haya una relación estrecha entre macollamiento y rendimiento cuando se establecen poblaciones poco densas, especialmente si las plantas disponen de radiación solar, de nutrientes y de agua en abundancia y si, además, lo anterior ocurre hacia el final de la fase vegetativa y en la primera mitad de la fase reproductiva (cuando se define el número de panículas). En cambio, si la población de plantas es numerosa, no debe esperarse en ella una relación entre rendimiento y macollamiento, porque la mayoría de las panículas se habrá originado en el tallo principal de las plantas.

En 1983 se descubrió en Madagascar un *sistema de 'intensificación'* del cultivo del arroz que se aplica actualmente en varios países asiáticos. Se basa este sistema en el desarrollo de plantas vigorosas mediante prácticas de manejo que reducen la competencia entre las plantas al comienzo del crecimiento. Estas plantas tienen raíces abundantes y profundas, producen de 30 a 100 macollas por planta (muchas de ellas efectivas), y sus panículas desarrollan muchos granos. Hay informes de que este sistema permite obtener rendimientos superiores a 8 t/ha (más que las variedades tradicionales), en suelos pobres y sin aplicar fertilizantes químicos (Stoop et al., 2002).

Un número bajo de macollas puede tener efectos benéficos como cuando se desarrolla un manto foliar abierto que permite la iluminación de los estratos inferiores del follaje. Evans (1994) sostiene que las macollas estériles representan una economía de asimilados que pueden invertirse en la producción de grano. En todo caso, cierto grado de macollamiento es deseable porque puede ser necesario compensar por pérdidas de población.

Manto foliar

La producción de arroz está íntimamente relacionada con el desarrollo de las hojas, ya que el rendimiento del cultivo depende de la magnitud de la fotosíntesis que se realice en las hojas. La actividad fotosintética del cultivo depende de la cantidad de energía radiante que éste pueda interceptar. La *interceptación de esta energía* depende de las características de las hojas, como su color, su grosor, su tamaño, el ángulo de inserción de su lámina en el tallo, y su duración. Se han podido aumentar las tasas de fotosíntesis incrementando el área foliar y la duración de las hojas. Es deseable que haya una expansión rápida de las hojas en el estado de plántula por dos razones: hay un

cubrimiento rápido del terreno y la planta logra interceptar más pronto la radiación solar.

Los análisis revelan que, al aumentar el índice de área foliar (IAF), se incrementa la tasa de producción de materia seca hasta llegar a un valor crítico, después del cual un incremento del área foliar no conduce a un nuevo aumento en la producción de materia seca. Si se desea aumentar esa producción aumentando el IAF, es preciso interceptar más radiación solar, y esto se logra incrementando el área iluminada. Ahora bien, las *hojas verticales* forman mantos de hojas que tienen un *valor crítico de área foliar* más alto que los mantos conformados por hojas horizontales, porque permiten que la luz penetre hasta los estratos inferiores del manto. Yoshida (1972) informa que hay variedades de arroz con valores de IAF críticos entre 4 y 7, y añade que, en tales cultivos, sólo se mide el área de la lámina para calcular el IAF.

Las variedades IR de alto rendimiento, liberadas a partir de 1966, tienen láminas foliares que se insertan en el tallo en ángulo agudo y desarrollan, por tanto, mantos foliares que dan un *IAF crítico alto*. En general, el rendimiento alto de las variedades japonesas y filipinas está asociado con hojas más erectas y con bajos coeficientes de extinción después de la antesis (Saitoh et al., 1990).

Las plantas de arroz presentan, al inicio de su fase reproductiva, el mayor número de hojas y, por tanto, el área foliar más extensa y la mayor capacidad de captación de energía radiante. El área foliar disminuye gradualmente a medida que se desarrolla la panícula, porque se desintegran las hojas más viejas y se prolonga el intervalo de emergencia de las más nuevas. Sin embargo, se mantiene un área foliar relativamente alta porque las últimas cinco hojas son más grandes y tienen más duración.

El tallo principal presenta, al menos, *cinco hojas funcionales* desde el momento de la iniciación de la panícula hasta su emergencia. De ellas, las tres superiores proporcionan los carbohidratos con que se llenan los granos; por tanto, cualquier situación o condición que afecte la actividad de estas tres hojas influye en el rendimiento de la planta.

Fase reproductiva

Esta fase comienza cuando la yema terminal del tallo principal y las yemas terminales de las macollas son inducidas a producir un primordio floral. Esa acción reproductiva está asociada con los siguientes cambios morfológicos de la planta: algunas macollas mueren, los tallos se alargan, se observa un 'embuchamiento' en el extremo de los tallos, y ocurre la emergencia de la panícula. En esta fase se define el *tamaño de los 'depósitos del rendimiento'*, es decir, el número potencial de granos, el cual está representado por el número de panículas por unidad de área (del terreno) y por el número de espiguillas por panícula. Asimismo, las macollas que sufran un retardo en la emisión de sus hojas mueren, generalmente, antes de la antesis; este número de macollas muertas aumenta cuando se incrementa la densidad de siembra (Nemoto et al., 1995).

Las fuentes de fotoasimilados son los tejidos fotosintéticos. De ahí se mueven estos compuestos hacia los vertederos o depósitos, que son los tejidos que los utilizan y los órganos de almacenamiento. Existen relaciones especiales entre las fuentes y los depósitos, que controlan la distribución de los asimilados a diferentes órganos; esas relaciones son reguladas por interacciones entre los genes y el ambiente que todavía no han sido entendidas plenamente. El crecimiento celular activo durante la fase

reproductiva favorece el movimiento de fotoasimilados hacia la panícula.

Por lo general, transcurren 30 días, desde que la panícula se inicia hasta que sobresale de la hoja bandera; durante este período, varias funciones relacionadas con el rendimiento son afectadas por las siguientes condiciones adversas: las deficiencias nutricionales, especialmente la de N; la radiación solar de poca intensidad; la temperatura muy baja o muy alta; y la deficiencia de humedad en el medio. Algunas de estas condiciones se consideran enseguida:

- El número final de *espiguillas* depende del balance entre sus tasas de iniciación y de degeneración; ahora bien, las tasas de iniciación son altas si las *condiciones nutricionales* del medio son favorables. Por ejemplo:

  - la iniciación de un número alto de espiguillas se estimula si hay *N disponible*;
  - no habrá degeneración de los primordios florales si *se evitan las deficiencias* de elementos nutricionales durante el 'embuchamiento'.

  Se puede impedir, por tanto, que disminuya el rendimiento respecto a su potencial, si se hacen aplicaciones de los elementos deficientes alrededor de 25 días antes de la emergencia de la panícula.

- La producción de *polen* se reduce y, por ende, el número de espiguillas estériles aumenta si las plantas experimentan *temperaturas bajas* alrededor de 12 días antes de la emergencia de la panícula; en ese momento ocurre la meiosis en las anteras, y la hoja bandera completa su expansión (Evans, 1994). Asimismo,

  - la duración de la fase reproductiva se acorta cuando la *temperatura es alta*;
  - la formación de *espiguillas* se prolonga cuando la temperatura es moderada.

En la floración, los tallos tienen una porción con entrenudos alargados y otra con entrenudos no alargados. Los entrenudos empiezan a alargarse justo cuando se inicia el desarrollo de la panícula, y el pedúnculo empieza a alargarse durante el período de alargamiento más activo de la panícula. Se establece, por tanto, una *competencia por fotoasimilados* entre los tallos y las panículas durante el alargamiento de los entrenudos. Se ha sugerido (Evans, 1994) que la menor inversión de fotoasimilados que hacen las variedades semienanas en el crecimiento de sus tallos estaría asociada con el índice de cosecha más alto y el mayor rendimiento de grano que tienen esas variedades en comparación con las variedades altas.

Fase de maduración

Se denomina también 'fase de llenado del grano' porque este proceso es el que la caracteriza. Se extiende desde la antesis hasta la madurez fisiológica de la panícula. La maduración propiamente tal comienza con la fertilización de los óvulos; sigue luego el desarrollo del ovario fecundado que se convierte en grano de arroz (el fruto). Este proceso de maduración, en el que se llenan los 'depósitos del rendimiento', dura alrededor de 30 días en las condiciones ambientales de los trópicos.

Es de esperar que, a mayor duración de la fase de maduración, la producción de materia seca se prolongue y sea mayor el rendimiento de grano. Pues bien, Dingkuhn et al. (1991) estudiaron las relaciones entre la productividad en la etapa de llenado del grano y la duración

del cultivo, y encontraron que esta duración afectó la producción de biomasa pero no influyó en el rendimiento agronómico.

Depósitos

Se ha considerado que el rendimiento del arroz está conformado por 'depósitos' y productos. Los depósitos son los óvulos de las espiguillas que estén disponibles para ser fecundados. Al llegar la maduración ya está definido el número de depósitos y éstos representan el rendimiento potencial. El tamaño del conjunto de depósitos se define como el *número de espiguillas* por unidad de área (del terreno), y se calcula multiplicando el número de panículas que haya en la unidad de área, por el número promedio de espiguillas de una panícula. Hay dos enfoques en el manejo del cultivo, según el desarrollo de las plantas:

– en las fases vegetativa y reproductiva, ese manejo debe dirigirse a maximizar el número de panículas y de espiguillas;
– en la fase de maduración, en cambio, ese manejo debe favorecer al máximo el llenado completo del mayor número posible de espiguillas.

Productos

El rendimiento puede estar limitado por el tamaño de los depósitos o por el de las fuentes, lo que depende de las condiciones de crecimiento de las plantas en las diferentes etapas de desarrollo. Los materiales que llenan los depósitos en la fase de maduración son, de un lado, los *productos de la fotosíntesis* realizada por las tres hojas superiores y, del otro, las *reservas* localizadas en los tallos y movilizadas después de la fecundación de los óvulos.

Cuando la producción de *carbohidratos* durante el *llenado del grano* es deficiente, el rendimiento será bajo. La radiación solar baja, por ejemplo, afecta mucho el rendimiento cuando ocurre en la segunda parte del período de llenado del grano. En el 2000, algunos investigadores japoneses observaron que una deficiencia de asimilados durante los primeros 10 días de la fase de maduración no afecta el peso final de los granos, si el suministro de asimilados durante el resto de esa fase satisface la necesidad que tenga la planta más tarde de incrementar la materia seca.

Reservas

El aporte de las reservas al llenado de los granos varía según la *variedad* de arroz y es afectado, además, por las condiciones del *ambiente* (clima y nutrición). Ambos factores se discuten a continuación:

- Samonte et al. (2001) observaron que, en los ***genotipos*** en que el peso del grano es bajo, el aporte de las reservas al llenado de los granos es pequeño. Lubis et al. (2003) encontraron diferencias entre los cultivares de arroz respecto a la cantidad de carbohidratos de reserva que destinan al llenado de los granos, y hallaron que usan las reservas para suplir una baja producción de carbohidratos durante esa función de llenado. Se observó también que, cuando es baja la radiación solar durante el llenado de los granos, la planta necesita utilizar las reservas de carbohidratos para lograr un rendimiento alto (Laza et al., 2003).
- En las ***condiciones de los trópicos***, la *temperatura* favorece la maduración del arroz: en algunos sitios, sin embargo, ésta puede retardarse cuando la temperatura desciende por debajo de 20 °C. Las temperaturas altas durante la maduración (especialmente las nocturnas) hacen disminuir el rendimiento. Peng et al. (2004) evaluaron el impacto del *calentamiento global* en el rendimiento del arroz utilizando

datos de temperatura y de rendimiento registrados entre 1979 y 2003, y observaron dos efectos:

- el rendimiento de grano disminuye en 10% por cada grado de aumento de la temperatura mínima en la época seca; y
- el efecto de la temperatura máxima en el rendimiento es insignificante.

En general, el rendimiento del arroz es más alto en las épocas y regiones en que se presentan temperaturas nocturnas bastante más bajas que las diurnas, porque en esas condiciones se reduce el gasto respiratorio de asimilados; este fenómeno fue observado en Japón en 1989.
Si el suministro de agua es adecuado, la *temperatura* y la *radiación solar* son los factores ambientales que más afectan el rendimiento del arroz (Yoshida, 1977); por ejemplo, la combinación de alta radiación solar y baja temperatura contribuye a que el rendimiento del arroz sea alto.
Agrega este autor que el efecto de los factores climáticos (durante la fase reproductiva o en la maduración) en el rendimiento depende de la *localidad* y de la *época de cultivo*; recomienda, por tanto, que se estudien tanto el número de espiguillas por metro cuadrado como el porcentaje de granos llenos que produce el cultivo en las condiciones específicas de cada época.

- La escasez de ***agua*** durante la maduración afecta el rendimiento del arroz. Por ejemplo, si en un cultivo de arroz con riego se drena el terreno muy pronto, habrá al final una pérdida en el rendimiento. El efecto del *estrés de agua* de las plantas en el rendimiento es menor durante la maduración que durante el desarrollo de la panícula (Boonjung y Fukai, 1996). Singh e Ingram (2000) sometieron las plantas a estrés de agua desde el embuchamiento hasta la maduración, y comprobaron que el rendimiento se había reducido más que cuando estuvieron sometidas a ese estrés desde el inicio de la panícula hasta su emergencia.
  Lafitte y Courtois (2002) compararon varios cultivares de arroz respecto a su susceptibilidad a la sequía, y encontraron diferentes respuestas que dependían de que la humedad del ambiente fuera escasa (con estrés en las plantas) o adecuada (por el suministro de agua). Entre las respuestas favorables a la *situación de sequía* estaban la maduración temprana, el potencial bajo de agua de las raíces, el área foliar baja (menor transpiración) y las raíces profundas (mayor absorción). La sequía moderada durante el llenado de los granos incrementa el rendimiento (Yang et al., 2003) porque apresura la senescencia de toda la planta, y este fenómeno acelera la movilización de sus reservas para poder completar la etapa clave del llenado de los granos.
- La ***deficiencia de N*** en la planta acelera el envejecimiento de las hojas y acorta el período de llenado de los granos; estas hojas se envejecen, entre otras razones, porque el nitrógeno que contienen se moviliza para atender la demanda que hacen los granos de este elemento. Se han hecho dos observaciones respecto a la duración de las hojas:

  - la aplicación de N durante la formación de la panícula contribuye a prolongar la *duración del área foliar* en la fase de maduración;
  - cuando ocurre alguna limitación en el desarrollo de las raíces al momento de la emergencia de la panícula, las hojas de esas plantas *duran poco tiempo* porque

los nutrientes absorbidos no son suficientes para satisfacer también la demanda que hacen de ellos las espiguillas y los granos; por esta razón, la fase de maduración de estas plantas es corta y, por ende, su rendimiento es bajo.

Inversamente, lo que retarde la desaparición de los tejidos verdes de la planta, prolongará la actividad fotosintética e intensificará el proceso de llenado de los granos.

Volcamiento

El volcamiento (o acame) es la inclinación del tallo sobre el terreno hasta doblarse contra su superficie; esta condición se presenta en la fase de maduración cuando aumenta el *peso de la panícula* al llenarse los granos. Para esta época, el tallo se ha alargado completamente y ha alcanzado su altura máxima. Si se comparan los tallos de plantas volcadas y no volcadas (Hoshikawa, 1989), se observan diferencias entre ambos en la longitud y en el grosor de los entrenudos 4 y 5 (contando de arriba hacia abajo).

Es posible que estos entrenudos sean largos y delgados en las plantas volcadas porque reciben una cantidad proporcionalmente alta de *radiación solar* de 730 nm sobre radiación de 660 nm, lo que hace que se desarrollen de ese modo y sean, por lo tanto, susceptibles de doblarse. Esta condición se presenta en tres situaciones, principalmente: cuando el IAF es muy alto en la época en que los entrenudos se alargan, cuando la densidad de plantas es muy alta, y cuando se hacen aplicaciones excesivas de N. Las variedades semienanas de hojas erectas son menos susceptibles al vuelco que las tradicionales, y esta condición puede asociarse con la facilidad con que penetra la radiación roja de 660 nm, que limita el alargamiento, hasta la base de las plantas.

El acame está relacionado también con el *anclaje* imperfecto de las plantas por el desarrollo deficiente de las raíces debido a la aireación deficiente del medio durante el establecimiento. Hay, finalmente, una relación entre el volcamiento y el *drenaje* de los lotes (Terashima et al., 2003); estos autores estudiaron el efecto de la duración y la frecuencia de los períodos de drenaje en el volcamiento de las plantas de arroz, y observaron que éste se reducía (sin que disminuyera el rendimiento) cuando esos períodos eran más prolongados y se hacían con más frecuencia.

Ajuste del cultivo al ambiente

Las características del clima y del suelo en que se cultiva el arroz difieren según las localidades y según las épocas del año; por tal razón, hay *variaciones en el comportamiento* de las plantas que les impiden funcionar adecuadamente y expresar todo su potencial de rendimiento, así el genotipo sea de nivel bajo.

Aunque las condiciones ambientales sean variables, se puede obtener un rendimiento de arroz estable ajustando las *estrategias de producción* a esas condiciones (clima y suelo) en cada localidad y en cada época de cultivo. Ejemplos de tal ajuste son los siguientes:

- Emplear *genotipos adaptables* específicamente al clima y al suelo del sitio de producción.
- *Modificar el ambiente* para adecuarlo a las necesidades del genotipo empleado.

Ahora bien, si la diferencia entre la demanda de recursos de una variedad y la oferta ambiental del sitio de producción es grande, habrá que hacer más modificaciones al ambiente para obtener un rendimiento alto; la

producción de arroz en ese sitio sería, por tanto, poco competitiva y aun insostenible.

Para evitar ese extremo, el *manejo agronómico* debe dirigirse principalmente a favorecer la expresión de aquéllos caracteres de los genotipos que los hacen adaptables. Por ejemplo, el manejo que se dé al arroz de secano (no irrigado), aun en suelos pobres, debe incluir una densidad de población baja y una dosis baja de fertilizantes, para estimular el desarrollo de un sistema de raíces profundo y extenso que permita a las plantas adquirir agua y nutrientes en un volumen de suelo relativamente grande. El manejo opuesto (alta densidad y fertilización abundante) limitaría el desarrollo de las raíces.

A la radiación solar

Cuando la radiación solar es baja en un sitio o durante una época húmeda, la tasa de acumulación de materia seca se reduce y la productividad desciende. Se vio antes que la radiación solar escasa afecta los componentes del rendimiento en todas las fases de desarrollo de la planta. En la fase reproductiva, por ejemplo, la radiación solar ejerce una gran influencia en el rendimiento; asimismo, cuando es escasa, afecta todas las fases dichas y en ellas a los componentes del rendimiento propios de cada una, causando una reducción del rendimiento final.

Si la luminosidad del sitio es baja, hay que emplear *estrategias de manejo* que aumenten la eficiencia con que las plantas usan la radiación disponible; así se evita una pérdida drástica de rendimiento cuando se siembra en tales sitios. Las siguientes son estrategias posibles:

- Sembrar *genotipos adaptados* a condiciones de baja radiación, que pueden mantener altas tasas de fotosíntesis del manto foliar. Por ejemplo, los cultivares con IC alto y con buena capacidad para movilizar reservas tienen una probabilidad mayor de dar un alto rendimiento cuando ocurren descensos de radiación solar durante la etapa de llenado del grano (Laza et al., 2003).
- Sembrar *genotipos* que tengan buena *capacidad de recuperación* después de un período de baja radiación solar. Por ejemplo, investigadores japoneses (entre otros, Kobata y sus colaboradores), informaron sobre genotipos que pueden recuperarse de una primera mitad de su etapa de llenado en que hubo baja radiación, si en la segunda mitad de esa etapa la radiación fue la adecuada.
- Aplicar *prácticas agronómicas* que reduzcan el efecto de la baja luminosidad. Por ejemplo, disminuir la sombra que unas plantas hacen a otras ajustando la densidad de población y haciendo un control efectivo de las malezas.
- *Planificar la siembra*, para que las etapas de desarrollo del cultivo que exijan más radiación solar coincidan con los períodos de mayor luminosidad del sitio en que se cultiva; esta práctica conduce siempre a rendimientos altos.

En general, la producción agrícola maneja los cultivos de manera que aprovecha, con eficacia y eficiencia, los factores ambientales que no pueden cambiarse fácilmente.

A la temperatura

El rendimiento del arroz tiende a aumentar en sitios del trópico de mayor altitud porque las fases de desarrollo se prolongan en condiciones de ***temperatura baja***. Aumenta también en sitios en que la temperatura nocturna es baja (especialmente durante la fase de maduración), porque el gasto respiratorio

de fotoasimilados en la noche (cuando la fotosíntesis está inactiva) es menor, por lo cual hay mayor disponibilidad de asimilados para los granos. No obstante, en tales sitios y en muchas regiones áridas hay descensos de temperatura que afectarán el rendimiento si se presentan durante procesos sensibles de la fase reproductiva de las plantas.

Las siguientes estrategias ayudan a reducir los efectos adversos que causan al arroz las temperaturas bajas:

- Sembrar *genotipos* tolerantes de la temperatura baja.
- Escoger una *fecha de siembra* apropiada para que las etapas más sensibles del cultivo coincidan con las épocas en que es menor la probabilidad de que ocurran descensos de temperatura.
- Considerar la posibilidad de *incorporar genes* de una variedad Japónica, que tolera las temperaturas bajas, a una variedad del grupo Índica.

Las ***temperaturas muy altas*** también tienen efectos adversos en la producción de arroz. Kobata y Uemuki (2004) señalan que estas temperaturas descompensan la relación entre la tasa de acumulación de asimilados en el grano y la duración del período de llenado, ya que un incremento de la primera no compensa el acortamiento del segundo. Este efecto de las temperaturas altas es más perjudicial si se presenta cuando la radiación solar es baja, porque en esa situación la planta dispone de menos asimilados para llenar los depósitos. La respuesta a la temperatura alta varía según el genotipo de arroz, así:

- En el grupo Índica, las tasas de fotosíntesis a una temperatura alta son más altas que en el grupo Japónica.
- En el grupo Índica, el macollamiento es menos inhibido por la temperatura alta que en el grupo Japónica.
- La temperatura óptima para el llenado del grano es más alta en los genotipos Índica que en los Japónica (Yoshida, 1981).

Al agua disponible

El carácter errático de las lluvias hace más frecuentes las deficiencias de agua en los cultivos de secano. Es, por tanto, de mucha importancia en este sistema el uso de variedades que tengan algún mecanismo de adaptación al estrés de agua.

Deficiencia de agua

Las plantas tienen dos *mecanismos de adaptación* a la deficiencia de agua del medio en que se encuentran: uno, llamado escape, consiste en ajustar la duración de su ciclo de vida a la disponibilidad de agua del medio; el otro, llamado 'evitación', le facilita a la planta el uso de una cantidad grande del agua almacenada en el terreno, como ocurriría con el desarrollo de raíces profundos y extensos. Un ejemplo del primer caso: cuando hay sequía, la maduración temprana beneficia las plantas (Lafitte y Courtois, 2002).

El buen *manejo agronómico* soluciona también las deficiencias de humedad del medio de varias maneras:

- Empleando variedades de ciclo rápido (desarrollo temprano) en sitios donde el agua disponible dura poco tiempo.
- Aplicando prácticas como la labranza profunda, la cual propicia el almacenamiento de cantidades considerables de agua en el suelo, y favorece también el desarrollo de un sistema de raíces extenso y profundo, que capta más agua que otro reducido y superficial.

- Estableciendo poblaciones de plantas debidamente espaciadas.

Inundación y nivel freático
La inundación del suelo y el nivel freático alto no permiten que haya mucho oxígeno disponible en el suelo, lo cual limita el crecimiento de las raíces. Esta *deficiencia de oxígeno* es subsanada por el arroz mediante el *aerénquima*, un tejido que transporta oxígeno hacia las raíces; no obstante, el crecimiento de las raíces del arroz en un suelo inundado es, en general, menor que en un suelo aireado.

Hay variedades de arroz que se adaptan bien a determinada condición de humedad del suelo; otras, en cambio, pueden desarrollar cierta *tolerancia* de la deficiencia de oxígeno del suelo. Un mecanismo fisiológico asociado con esta tolerancia (Colmer, 2002) es el aumento de la porosidad de los tejidos interiores de la raíz y la formación de una barrera en los exteriores que evita la pérdida radial de oxígeno. La raíz experimenta así cambios plásticos en su estructura que facilitan el movimiento del oxígeno a los puntos de crecimiento, para evitar que se perturbe ese crecimiento en el suelo anegado.

A las características del suelo

El arroz se cultiva en suelos cuyas propiedades químicas y fisicas difieren mucho; por consiguiente, tanto las variedades como el manejo de los suelos han debido adaptarse a esas condiciones edáficas. En un suelo poco fértil o de baja disponibilidad de nutrientes, se pueden obtener rendimientos satisfactorios de varias maneras:

- Aplicando los elementos nutricionales deficientes.
- Corrigiendo las condiciones que limitan la disponibilidad de los nutrientes como la acidez.
- Empleando variedades que se adapten a esos suelos.

Una de las principales ***adaptaciones*** de una variedad de arroz a un suelo pobre es su capacidad de desarrollar un *sistema de raíces* extenso y profundo, el cual permite a la planta no sólo extraer nutrientes de un volumen amplio de suelo sino también agua, cuando haya una deficiencia hídrica en las capas superiores del suelo.

Las variedades que tienen una fase vegetativa prolongada pueden *almacenar nutrientes* suficientes para satisfacer la demanda que de ellos hace la planta en etapas posteriores de su desarrollo. Cuando estas variedades se siembran en suelos poco fértiles, deben manejarse en forma adecuada para que, desarrollando raíces ramificadas y profundas, aprovechen la ventaja que les da su capacidad de acumular nutrientes.

Fisiología y fitomejoramiento

El potencial de rendimiento de las variedades del grupo Índica aumentó en los años 60 porque los fitomejoradores cambiaron el *tipo de planta*, es decir, seleccionaron caracteres morfológicos asociados con una alta eficiencia en la utilización de los recursos.

Tipo de planta mejorado
Los primeros caracteres que modificaron fueron la altura de la planta y la orientación de las hojas. Hubo dos razones para estos cambios:

- Disminuir la susceptibilidad al vuelco de las variedades altas, que se agudizaba con la fertilización nitrogenada requerida para aumentar su rendimiento.
- Mejorar la eficiencia de utilización de la radiación solar que tenían las hojas grandes y horizontales.

Se hizo entonces selección por *hojas cortas y erectas* con el fin de aumentar la penetración de la radiación solar a las capas inferiores de hojas y de iluminar un área foliar más grande. Se *acortaron los entrenudos* del nuevo tipo de planta y aumentó así su fortaleza, lo que les permitió soportar panículas pesadas con menor riesgo de acame de la planta. Estos cambios mejoraban el rendimiento porque permitían lo siguiente:

- Aumentar las aplicaciones de nitrógeno.
- Incrementar el área foliar sin causar exceso de sombra entre las hojas.
- Aumentar el peso de las panículas reduciendo el riesgo de volcamiento de la planta.

Peng et al. (1999) sostienen que, desde la liberación de la variedad IR 8 en 1966, los fitomejoradores se han esforzado mucho por seleccionar materiales según su rendimiento; no obstante, han tenido poco éxito en mejorar el potencial productivo del arroz en los trópicos, el cual se ha mantenido desde entonces en cerca de 10 t/ha. Para superar este estancamiento, al final de los años 80 los científicos del IRRI se propusieron modificar el tipo de planta de las variedades de alto rendimiento que se cultivan actualmente.

Se han obtenido materiales genéticos con atributos que deberían contribuir a aumentar su productividad. Entre las características mejoradas están las siguientes:

- De 3 a 4 macollas por planta (en siembra directa).
- Pocas macollas improductivas.
- De 200 a 250 granos por panícula.
- De 90 a 100 cm de altura de la planta.
- Tallos gruesos y fuertes, con hojas gruesas de color verde oscuro y erectas.
- Un sistema de raíces vigoroso.
- Un ciclo de vida de 100 a 130 días.
- Un índice de cosecha alto.

Ahora bien, los materiales obtenidos con tales caracteres presentaron una baja producción de biomasa, un llenado de granos deficiente y, en consecuencia, un rendimiento bajo. Continúa el trabajo de corrección de estas deficiencias empleando nuevas estrategias para seleccionar materiales según el nuevo tipo de planta. De esta labor no hay aún informes sobre avances notables respecto a la mayor expresión del potencial de rendimiento.

De acuerdo con Evans (1993), la principal característica utilizada para aumentar el rendimiento potencial ha sido el incremento del *índice de cosecha* (IC), que es la cantidad de materia seca que se destina proporcionalmente al grano. El IC del arroz es influenciado por la duración de las etapas de desarrollo de la planta y (así como el rendimiento) por factores del ambiente. Una variedad puede tener la capacidad para destinar una cantidad proporcionalmente grande de los productos de fotosíntesis a la formación de panículas, espiguillas y granos; sin embargo, no podrá lograrlo si no se dan las condiciones de radiación solar, de temperatura, y de disponibilidad de agua y nutrientes apropiadas. Ésta es la razón de que el manejo agronómico de un cultivo sea tan importante para obtener un alto rendimiento.

Densidad y nutrición mejores

El rendimiento de grano depende también de ciertos niveles de competencia entre las plantas. Al elevar la *densidad de siembra* aumentan dos variables: una, la producción de biomasa hasta cuando se llega a una densidad crítica; otra, la producción de grano, pero hasta una densidad crítica más baja. En cambio, el IC decrece cuando aumenta la

densidad de siembra más allá de un nivel crítico. Se podría pensar entonces que, en un ambiente dado, hay una densidad de *población óptima* que permite obtener un alto rendimiento de grano.

No sólo la densidad de población alta tiende a favorecer más la producción de biomasa que la producción de grano: hay *otros factores*, como el N, que hacen el mismo efecto. Por consiguiente, hay que regular el nivel de tales factores para obtener un rendimiento que esté cada vez más cerca del rendimiento potencial de la variedad de que se trate. Hay que emplear, por tanto, el IC como una guía de manejo del cultivo: el IC debe ser alto y debe usarse en conjunto con los componentes del rendimiento para detectar los aciertos y las fallas que inciden en la producción de arroz.

Rendimiento planificado

La producción de arroz se encuentra aún en la etapa de 6 t/ha de rendimiento empleando variedades cuyo rendimiento potencial es de 10 t/ha; es necesario, por tanto, hacer cambios en las prácticas agronómicas para aumentar el rendimiento. Por ejemplo, si la meta es un rendimiento de 7 t/ha, hay que obtener 0.7 kg/m^2 de grano. Estos 700 g se obtienen con el concurso de 366 panículas/m^2, porque cada una aporta 85 granos y el peso de 1000 granos es de 22.5 g. Suponiendo que no hay macollamiento (que compensaría por las plantas perdidas), las 366 panículas provienen de 366 plantas/m^2, una densidad que se obtiene con 84 kg/ha de semilla. Si cada planta de la variedad empleada produce una macolla, se necesitarían solamente 42 kg/ha de semilla.

En la hacienda La María, del municipio de Tuluá, se sembraron 20 ha de arroz en surcos, utilizando 54 kg/ha de semilla y manteniendo el nivel de agua continuamente cerca de la capacidad de campo: se obtuvo así un rendimiento de 7.0 t/ha (E. García, comunicación personal).

Caracteres fisiológicos críticos

El estudio de la fisiología sigue sirviendo como apoyo del fitomejoramiento de arroz, porque ayuda a identificar *caracteres críticos* de selección. De ellos, los siguientes están aún en exploración: la posibilidad de mejorar la eficiencia de la fotosíntesis, la disminución del gasto de asimilados en la respiración, el aumento de la fracción de asimilados destinados al rendimiento agronómico, y la mayor eficiencia en el trasporte de asimilados hacia los depósitos que constituyen el ***rendimiento***.

Referencias bibliográficas

Anten, N.P.R.; Schieving, F.; Medina, E.; Werger, M.J.A.; Schuffelen, P. 1995. Optimal leaf area indices in C3 and C4 mono- and dicotyledonous species at low and high nitrogen availability. Physiologia Plantarum 95(4):541-550.

Ballaré, C.L.; Casal, J.J. 2000. Light signals perceived by crop and weed plants. Field Crops Research 67(2):149-160.

Boonjung, H.; Fukai, S. 1996. Effects of soil water deficit at different growth stages on rice growth and yield under upland conditions. Field Crops Research 48(1):47-55.

Colmer, T. D. 2002. Aerenchyma and an inducible barrier to radial oxygen loss facilitate root aeration in upland, paddy and deep water rice (*Oryza sativa* L.). Annals of Botany 91:301-309.

Dingkuhn, M.; Schinier, H.F.; De Datta, S.K.; Dorffling, K.; Javellana, C. 1991. Relationships between ripening-phase productivity and crop duration, canopy photosynthesis and senescence in transplanted and direct-seeded lowland rice. Field Crops Research 26(3-4):327-345.

Evans, L.T. 1993. Crop evolution, adaptation and yield. Cambridge University Press, Cambridge, Inglaterra.

Evans, L.T. 1994. Crop physiology: Prospects for the retrospective science. In: Boote, K.J.; Bennett, J.M.; Sinclair, T.R.; Paulsen, G.M. (eds.). Physiology and determination of crop yield. American Society of Agronomy, Crop Science Society of America Soil Science Society of America. Madison, Wisconsin, EE.UU. p. 19-35.

Horie, T. 2001. Increasing yield potential in irrigated rice: breaking the yield barrier. In: Peng S.; Hardy, B. (eds.). Rice research for food security and poverty alleviation. International Rice Research Institute (IRRI), Los Baños, Filipinas. 692 p.

Kamoshita, A.; Zhang, J.; Siopongco, J.; Sarkarung, S.; Nguyen, H.T.; Wade, L.J. 2002. Effects of phenotyping environment on identification of quantitative trait loci for rice root morphology under anaerobic conditions. Crop Science 42:255-265.

Kiniry, J.R.; McCauley, G.; Xie, Y.; Arnold, J.G. 2001. Rice parameters describing crop performance of four U.S. cultivars. Agronomy Journal 93:1354-1361.

Kobata, T.; Uemuki, N. 2004. High temperatures during the grain filling period do not reduce the potential grain dry matter increase of rice. Agronomy Journal 96:406-414.

Kondo, N.; Pablico, P.P.; Aragonés, D.V.; Agbisit, R.; Abe, J.; Morita, S.; Courtois, B. 2003. Genotypic and environmental variations in root morphology in rice genotypes under upland field conditions. Plant and Soil 255:189-200.

Lafitte, H.R.; Courtois, B. 2002. Interpreting cultivar *x* environment interactions for yield in upland rice. Crop Science 42:1409-1420.

Lafarge, T.A.; Hammer, G.L. 2002. Tillering in grain sorghum over a wide range of population densities: modelling dynamics of tiller fertility. Annals of Botany 90:99-110.

Laza, M.R.C.; Peng, S.; Akita, S.; Saka, H. 2003. Contribution of biomass partitioning and translocation to grain yield under sub-optimum growing conditions in irrigated rice. Plant Production Science 6:28-35.

Li, X.; Quian, Q.; Fu, Z.; Wang, Y.; Xion, G.; Zeng, D.; Wang, X.; Liu, X.; Teng, S.; Hiroshi, F.; Yuans, M.; Luo, D.; Hant, B.; Li, J. 2003. Control of tillering in rice. Nature 422:618-621.

Lubis, I.; Shiraiwa, T.; Ohnishi, M.; Horie, T.; Inoue, N. 2003. Contribution of sink and source sizes to yield variation among rice cultivars. Plant Production Science 6(2):119-125.

Morita, S.; Shiratsuchi, H.; Takahashi, J.; Fujita, K. 2004. Effect of high temperature on grain ripening in rice plants: Analysis of the effects of high night and high day temperatures applied to the panicle and other parts of the plant. Japanese Journal of Crop Science 73(1):77-83.

Nemoto, K.; Morita, S.; Baba, T. 1995. Shoot and root development in rice related to the phyllochron. Crop Science 35:24-29.

Peng, S.; Cassman, K.G.; Virmani, S.S.; Sheehy, J.; Khush, G.S. 1999. Yield potential trends of tropical rice since the release of IR8 and the challenge of increasing rice yield potential. Crop Science 39:1552-1559.

Peng, S.; Huang, J.; Sheehy, J.E.; Laza, R.C.; Visperas, R.M.; Zhong, X.; Centeno, G.S.; Khush, G.S.; Cassman, K.G. 2004. Rice yields decline with higher night temperature from global warming. PNAS 101(27):9971-9975.

Saitoh, H.; Shimoda, H.; Ishihara, K. 1990. Characteristics of dry matter production process in high yielding rice varieties. I: Canopy structure and light intercepting characteristics. Japanese Journal of Crop Science 59:130-139.

Samonte, S.O.; Wilson, L.T.; McClung, A.M.; Tarpley, L. 2001. Seasonal dynamics of nonstructural carbohydrate partitioning in 15 diverse rice genotypes. Crop Science 41:902-909.

Sasaki, R.; Toriyama, K.; Shibata, Y.; Sugimoto, M. 2004. Effect of suppression of tiller emergence on the relationship between seedling density and nodal position of the last visible primary tiller in direct seeding cultivation of rice. Japanese Journal of Crop Science 73(3):309-314.

Singh, H.; Ingram, K.T. 2000. Sensitivity of rice (*Oryza sativa* L.) to water deficit at three growth stages. Crop Research 20(3):355-359.

Slaton, N.A.; Linscombe, S.D.; Norman, R.J.; Gbur Jr., E.E. 2003. Seeding date effect on rice grain yields in Arkansas and Louisiana. Agronomy Journal 95:218-223.

Stoop, W.; Uphoff, N.; Kassam, A. 2002. A review of agricultural research issues raised by the System of Rice Intensification (SRI) from Madagascar: Opportunities for improving farming systems for resource-poor farmers. Agricultural Systems 71:249-274.

Terashima, K.; Taniguchi, T.; Ogiwara, H.; Umemoto, T. 2003. Effects of irrigation management on lodging tolerance and yield of directly seeded rice. Japanese Journal of Crop Science 72(3):275-281.

Yang, J.; Zhang, J.; Wang, Z.; Liu, L.; Zhu, Q. 2003. Postanthesis water deficits enhance grain filling in two-line hybrid rice. Crop Science 43:2099-2108.

Yin, X.; Lantinga, E.A.; Schapendonk, A.C.M.; Zhong, X. 2003. Some quantitative relationships between leaf area index and canopy nitrogen content and distribution. Annals of Botany 91:893-903.

Yoshida, S. 1972. Physiological aspects of grain yield. Annual Review of Plant Physiology 23:437-464.

Yoshida, S. 1977. Rice. In: Alvim, P. de T.; Kozlowski, T.T. (eds.). Ecophysiology of tropical crops. Academic Press, Nueva York. p. 57-87.

Yoshida, S. 1981. Fundamentals of rice crop science. International Rice Research Institute (IRRI), Los Baños, Filipinas. 269 p.

Zhang, W.; Kokubun, M. 2004. Historical changes in grain yield and photosynthetic rate of rice cultivars released in de 20th Century in Tohoku region. Plant Production Science 7:36-44.

Capítulo 8

Rizipiscicultura: Alternativa para la seguridad alimentaria

Víctor Degiovanni
Víctor Julio Atencio
Roger Enrique Charry

Contenido

	Página
Resumen	118
Abstract	118
Introducción	118
Manejo del arrozal	119
Refugios	119
Agua limpia	120
Manejo de los peces	123
Factores o componentes	123
Actividades	124
Manejo integrado del suelo	125
Mediante prácticas de manejo agronómico	125
Favoreciendo a los microorganismos del suelo	125
Mediante el manejo del abonamiento nutricional	127
Manejo integrado de arvenses	129
Mediante el manejo del cultivo	130
Mediante el manejo del agua	130
Por desyerba física o 'despalille'	130
Trasplante	130
Manejo integrado de plagas	132
Con buen manejo del cultivo	132
Con manejo biológico acertado	133
Manejo integrado de enfermedades	135
Con prácticas agronómicas	135
Mediante el control biológico integrado	136
Referencias bibliográficas	137

Resumen

La rizipiscicultura es un sistema de producción biológica o producción limpia, que consiste en la siembra simultánea de arroz y peces en un mismo terreno y al mismo tiempo, es decir, en los lotes que se inundan para el cultivo. El arroz es el producto principal y el de mayor importancia económica; el pescado proporciona una ganancia en dinero adicional o un suplemento de proteína para mejorar la dieta alimenticia de los productores. Se describen los principales aspectos y prácticas de la rizipiscicultura, tales como: manejo del arrozal, manejo de los peces, manejo integrado del suelo y de arvenses, trasplante, y manejo integrado de plagas y enfermedades.

Abstract

Rice-fish farming: A food security alternative

Rice-fish farming is a biological or clean production system that consists of the simultaneous farming of rice and fish on the same land and at the same time; in other words, in the plots flooded for rice cultivation. Rice is the main product and has greater economic importance, whereas the fish is both a source of additional income and a protein supplement that improves the nutritional quality of farmers' diets. The main aspects and practices of rice-fish farming are described, including: rice field management, fish management, integrated soil and crop management, transplanting, and integrated pest and disease management.

Introducción

La rizipiscicultura consiste en producir simultáneamente arroz y peces en un mismo terreno, es decir, en los lotes que se inundan para el cultivo. El arroz es el producto principal y el de mayor importancia económica; el pescado proporciona una ganancia en dinero o un suplemento de proteína para la dieta de los cultivadores. Esta integración de una actividad agrícola y otra piscícola puede aumentar el rendimiento de la primera, el arroz, entre 25% y 30% y, a la vez, proporcionar a los campesinos, mediante la segunda, un ingreso adicional (Degiovanni, 2005).

Este sistema se conoce desde hace más de 2000 años. De India fue introducido en el sudeste asiático, donde se desarrolló mucho. En Indonesia, donde se practica desde el siglo XIX, se ha convertido en una importante actividad rural. La escasez de alimentos durante la segunda guerra mundial impulsó este cultivo integrado en el Japón; más tarde se abandonó el sistema por razones estratégicas. Una de ellas fue el refinamiento de las técnicas de cultivo del arroz, que impuso el monocultivo de variedades de arroz de alto rendimiento, que requerían pesticidas y fertilizantes y permitían obtener dos o tres cosechas anuales.

La rizipiscicultura ha sido considerada desde hace mucho tiempo como una opción para *disminuir la desnutrición y la pobreza* en las regiones en desarrollo. El Comité del Arroz de la FAO reconoció la importancia del cultivo de peces en los campos de arroz en 1948 (FAO, 1957). Este sistema fue luego objeto de amplias discusiones en la Comisión de Pesca del Indo-Pacífico (CPIP), en la Comisión General de Pesca del Mediterráneo (CGPM), en la Reunión del Arroz de la FAO, y en la Comisión Internacional del Arroz (CIA). La CPIP y

la CIA (IRC, en inglés) formularon un programa conjunto para promover la investigación del cultivo de peces en los arrozales y para evaluar su utilidad. Sin embargo, el interés internacional menguó gradualmente a lo largo de los años, quizás por la necesidad de usar los pesticidas y los herbicidas que elevaban la productividad del arroz mejorado (Halwart y Gupta, 2006).

Hay dos formas de desarrollar la rizipiscicultura. En la forma sencilla (tan antigua como el cultivo del arroz), los peces no son manipulados; se permite entonces la entrada de los peces silvestres a los arrozales durante la inundación de los lotes, y se capturan peces más desarrollados al final del período de crecimiento del arroz. Hay otra forma en que se aplican técnicas para integrar el cultivo de los peces y del arroz, o para producir, en rotación, los peces y el arroz.

Entre las *ventajas* del ***sistema integrado*** se destacan las siguientes:

- Producción de alimento y generación de una ganancia adicional por el pescado.
- Control de moluscos y de insectos dañinos para el cultivo del arroz.
- Reducción del riesgo de pérdida de la cosecha con el pescado que se recolecta.
- Control de muchas malezas mediante la inundación continua del arrozal y porque los peces consumen sus raíces.
- Acceso más fácil del arroz a los nutrientes del suelo (y mayor producción de grano) por la agitación que hacen los peces del fondo del arrozal, liberando partículas de suelo y mezclando sus componentes.

Se pueden señalar algunas *desventajas* de este sistema de producción, como ocurre en otros sistemas (Atencio, 2005):

- Se restringe el uso de pesticidas y plaguicidas (considerados necesarios en el monocultivo del arroz).
- Puede necesitarse mucha más agua que para un cultivo simple de arroz.
- Requiere zanjas o canales (de 100 cm de profundidad) cavados en el fondo de los lotes del arrozal.
- Las zanjas dificultan la operación de drenaje.
- No se siembra arroz en el área ocupada por las zanjas (y, por tanto, se recolecta menos grano).
- Los peces producidos son, generalmente, más pequeños (y su producción total es menor) que los obtenidos en un estanque del tamaño del arrozal.
- Exige más trabajo que un cultivo simple de arroz.

Manejo del arrozal

En general, hay que modificar los campos de arroz tradicionales cuando se dedican al cultivo integrado de arroz y peces. Una modificación importante es hacer áreas más profundas en el arrozal que den refugio a los peces. Estas áreas se llaman *zanjas, canales* o *refugios* (Figura 1). Aunque su construcción y su ubicación varían de un sitio a otro, son una obra que decide el éxito de un cultivo integrado de arroz y peces, por las siguientes razones:

- Dan refugio a los peces cuando baja el nivel del agua de inundación.
- Proporcionan alimento a los peces.
- Cuando se drena el arrozal, facilitan la cosecha de los peces.

Refugios

Las refugios (canales de forma trapezoidal) deben tener, por lo menos, las siguientes dimensiones: 1 m de profundidad, 1.20 m de ancho en la superficie (base mayor) y 1 m de ancho en el fondo (base menor). Lo ideal es que

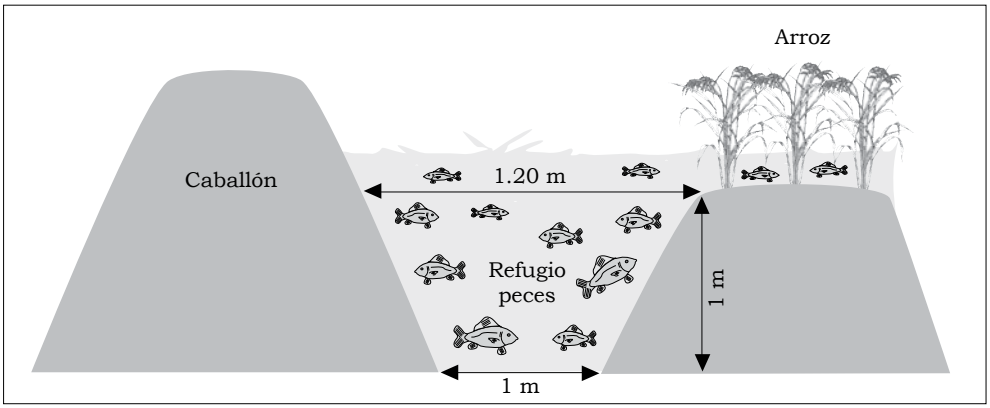


Figura 1. Refugios (zanjas) excavados en un cultivo integrado de arroz y peces.

ningún componente del arrozal (caballones y refugios) ocupe más del 10% del área total del sistema arroz-peces.

Para maximizar la producción de arroz, el área de la zanja no debe ocupar más que un 10% del área total del arrozal. Cuando se introduzcan los peces, debe haber agua suficiente para mantener una profundidad de 10 a 15 cm en el terreno plantado con arroz; así se evita que los peces queden atrapados en sitios poco profundos donde serían presa fácil de las aves (Figura 2).

Agua limpia

El agua de estos arrozales no debe estar contaminada con insecticidas, pesticidas o productos similares. En muchas partes del mundo, los cultivos integrados de peces y arroz han sido abandonados porque los peces no resistieron la contaminación química. Antes de 'sembrar' los peces (alevinos) en el arrozal, se debe consultar a un piscicultor para que evalúe la calidad del agua proveniente de las fuentes de riego comunales, contaminadas quizás por otros agricultores.

Los diques o caballones del arrozal deben ser altos y suficientemente fuertes para que puedan retener el agua sin que sufran filtraciones. Las dimensiones mínimas de un caballón son: 0.5 m de ancho y alrededor de 0.4 m de alto (Figura 3).

En muchos casos hay necesidad de *aplicar pesticidas* o plaguicidas al arrozal, pero no se recomienda hacerlo con productos a base de compuestos órgano-fosforados, de carbamatos o de productos clorinados. Deben seguirse los siguientes pasos para reducir al mínimo la posibilidad de matar a los peces o de afectar su crecimiento:

- Aplicar plaguicidas de origen biológico, cuando el manejo que se da a los insectos plaga (fitófagos) lo amerite.
- Hacer descender el nivel del agua del arrozal para que los peces migren a los refugios durante el tratamiento, y mantenerlos allí por lo menos 2 semanas después de aplicado el producto agroquímico.
- Elegir pesticidas o insecticidas biológicos que puedan aplicarse cerca de las raíces de las plantas o que puedan incorporarse al suelo (una vez drenado el terreno del arrozal).

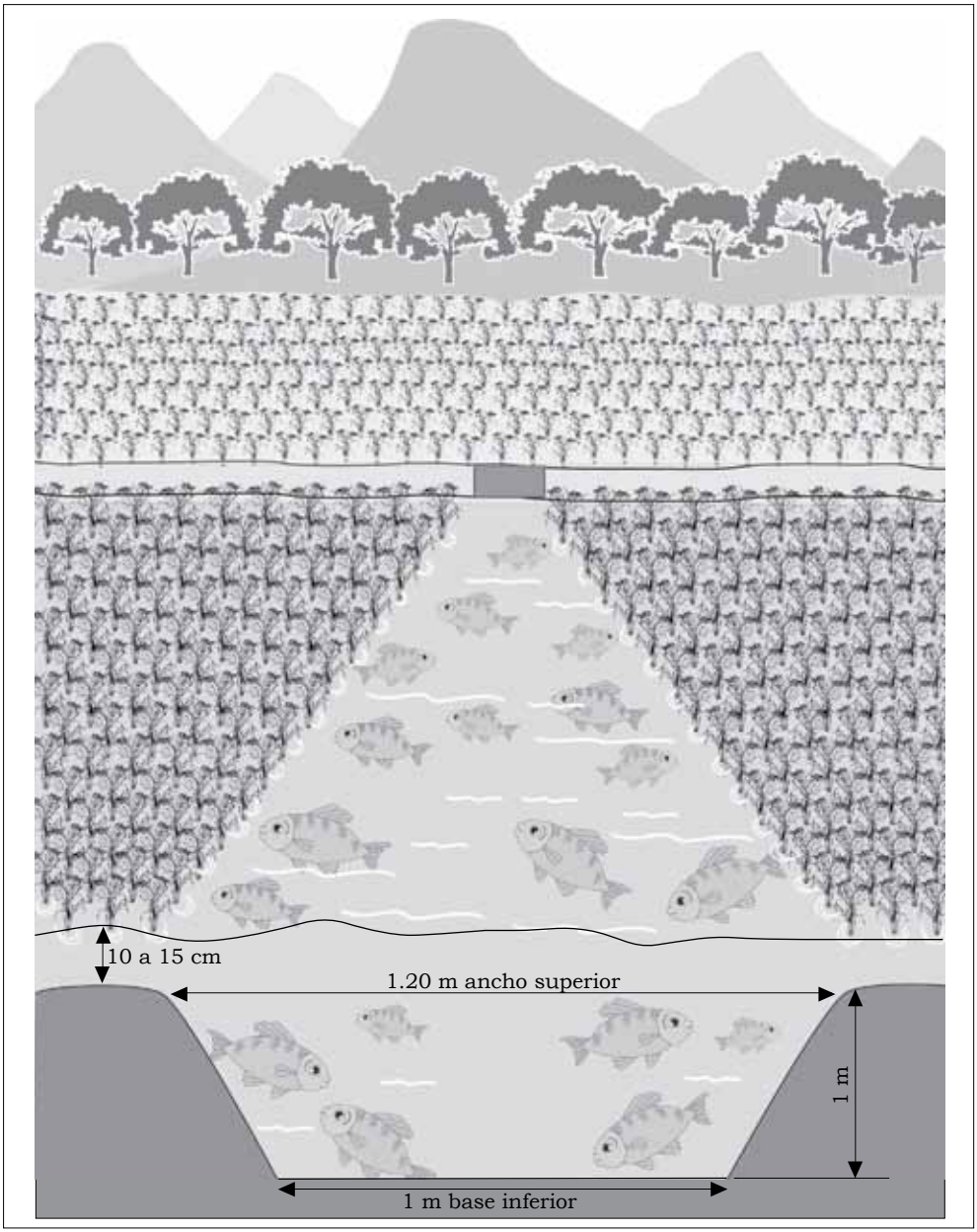


Figura 2. Medidas de los refugios (zanjas) y profundidad del agua en el arrozal.

El objetivo de este paso es evitar que el viento propague los residuos que dejan los agroquímicos asperjados.

- Si se ha aplicado algún producto agroquímico antes de la siembra de los peces, se aconseja hacer un bio-ensayo en el arrozal con algunos alevinos para saber si es segura su 'siembra'. Si los alevinos mueren, es necesario esperar varios días y repetir el ensayo hasta comprobar que el agua es apta para los peces.

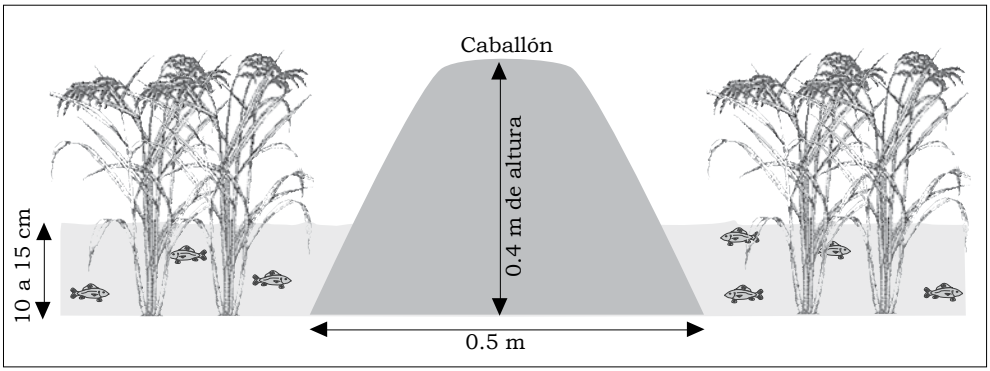


Figura 3. Medidas del caballón o dique.

- Colocar mallas en la entrada y en la salida del agua del arrozal (y de los refugios) para impedir el ingreso de peces silvestres y el escape de los peces sembrados (Figura 4).
  Se pueden usar compuertas hechas con malla de alambre (de 0.5 a 1 cm de ojo de malla) ajustada en marcos

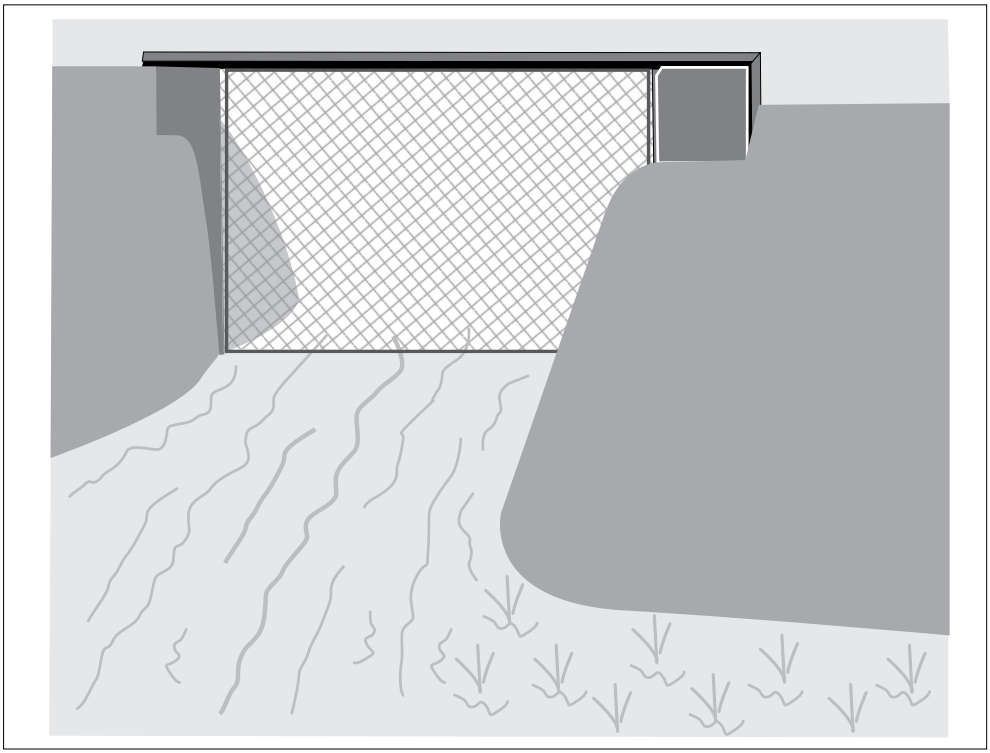


Figura 4. Malla de protección de los peces que se coloca en la entrada y en la salida del agua del arrozal y del refugio.

de madera. Otra solución, más simple, es una cortina de elementos de guadua o bambú (en lámina o en tallos delgados) en los que se harían rajaduras o aberturas para filtrar el agua. Es conveniente revisar las mallas diariamente y mantenerlas limpias, para evitar que el agua del arrozal se desborde (debido los desechos acumulados) cuando ocurra una lluvia fuerte y arrastre los peces.

Manejo de los peces

El manejo de los peces en este sistema depende de tres factores: la localización del arrozal, la especie a que pertenecen los peces y el número de peces sembrados. Por otra parte, el manejo de los peces en un campo de arroz comprende las siguientes actividades: siembra, fertilización, alimentación, control de la calidad del agua, cosecha y resiembra.

Factores o componentes

Especies
Los peces que se siembren en el agua de inundación de un arrozal deben ser capaces de tolerar las condiciones severas de ese ambiente; por ejemplo: agua poco profunda, temperaturas altas (hasta 40 °C), temperatura variable (variaciones de 10 °C en un día), niveles bajos de oxígeno y alta turbidez (Halwart y Gupta, 2006). Otra característica deseable en estos peces es el crecimiento rápido; así podrán alcanzar el tamaño comercial cuando el arroz esté listo para ser cosechado.

Dadas estas condiciones ambientales tan duras (y aun adversas), parecería que muy pocas especies de peces de valor comercial tendrían suficiente resistencia para habitar en el agua de un arrozal. Sin embargo, una revisión de las prácticas aplicadas en el cultivo de arroz y peces en el mundo indica que, en este sistema, se han cultivado con éxito casi todas las principales especies de agua dulce (incluyendo una de salmónidos) y hasta una especie de agua salobre; se han sembrado, además, algunas especies de crustáceos. En total, 37 especies de peces (de 16 familias) y 7 especies de crustáceos (de 4 familias). Las más cultivadas son las tilapias y varias especies de ciprínidos.

Muchas veces se cosechan moluscos, principalmente caracoles y almejas, en este sistema de arroz y peces, aunque hay poca información de que hayan sido sembrados deliberadamente. Lo mismo ocurre con las ranas y las tortugas de agua dulce recolectadas en estos arrozales (Halwart y Gupta, 2006).

Localización del sistema
El lote donde se implemente la técnica de la rizipiscicultura debe tener las siguientes características:

- Fácil acceso, para que puedan entrar los insumos y puedan salir los productos cosechados.
- Un sitio de vigilancia; lo ideal sería una casa con bodega para poder almacenar insumos y productos recolectados.
- Una fuente de agua en las cercanías.

Cantidad de peces
Cuando se emplean en este sistema las especies de peces llamados cachama y bocachico en Colombia, se requieren 2500 alevinos de la primera y 1500 alevinos de la segunda para sembrar 1 ha con peces.

Se acepta hasta un 5% de pérdida de alevinos cuando ocurren condiciones ambientales desfavorables al momento de la siembra o un ataque de predadores (aves, otros peces).

Actividades

Siembra
El método de siembra del arroz en la rizipiscicultura es el trasplante. Se establece previamente un semillero de arroz de 300 m^2, en el que se emplearán de 20 a 25 kg de semilla que darán suficientes plántulas para hacer el trasplante en un área de 1 ha.

Fertilización
Al final de la preparación mecánica del suelo, en el último pase del pulidor, se incorpora al suelo el abono orgánico (bovinaza, por ejemplo), el cual será una fuente nutricional para el cultivo (aporta nitrógeno) y para los peces, principalmente para el bocachico, (permite el crecimiento de flora microbiana alimenticia). Se hacen luego otras dos fertilizaciones:

- La segunda, cuando las plántulas de arroz, una vez trasplantadas, hayan superado el período de inactividad fotosintética debido al estrés del trasplante; en esta fertilización, que estimula el macollamiento de las plantas, se aplican 250 kg/ha de lombriabono.
- La tercera, cuando el cultivo entre en la etapa de máximo macollamiento; se aplica lombriabono a razón de 250 kg/ha.

Alimentación de los peces
En el sistema de rizipiscicultura se pueden emplear dos esquemas de producción de peces:

- ***Producción limpia***, en la que se permite alimentar a los peces con alimentos concentrados; de éstos hay muchos nombres comerciales, de buena calidad.
- ***Producción orgánica o biológica***, en la que los peces (en especial, la cachama) se alimentan con productos naturales de la zona, como frutas picadas (guayaba, mango) y granos (maíz, sorgo, etc.). También se usa el lombriabono, un producto muy importante en este esquema porque no sólo abona las plantas sino que suministra carne de lombriz para alimentar a los peces.

Cosecha
Hay dos épocas de cosecha en este sistema:

- **Primera época.** Arroz: cuando el cultivo cumpla su primer ciclo de vida (110 a 120 días), llegue a su madurez fisiológica y su grano tenga de 24% a 28% de humedad, se cosecha el arroz manualmente, así: se juntan varias panículas en un mazo (puño de arroz) y se cortan con hoz.
  Peces: simultáneamente, y ya transcurridos 120 días desde la siembra de los alevinos, se hace la primera pesca, esta vez de la especie llamada cachama, que es de crecimiento rápido; al momento de su captura, el peso promedio de un pez será de 370 g.
- **Segunda época.** Arroz: las plantas ya cosechadas se cortan a ras del suelo (o a una altura de 10 a 20 cm del suelo) para que rebroten como soca y se cosechen a los 3 meses.
  Peces: pasado ese tiempo, los bocachicos (la otra especie de peces que se sembró), cuyo crecimiento es más lento que el de las cachamas, están listos para la segunda pesca; al momento de su captura, el peso promedio de un pez será de 250 g.

Resiembra
Cuando una planta cosechada se corta, pero muere y no rebrota de manera adecuada —por alguna condición desfavorable del sitio en que se hallaba— se trasplanta en ese sitio una nueva plántula.

Manejo integrado del suelo

El manejo integrado del suelo del arrozal en el sistema de rizipiscicultura se hace en dos niveles: el inorgánico (el suelo como tal) y el orgánico (la vida microbiana del suelo).

Mediante prácticas de manejo agronómico

- Preparar el suelo cuando esté a *capacidad de campo*. La preparación del suelo inundado, haciendo 'fangueo' o batido, destruye su estructura; la preparación de un suelo muy seco trae consigo la erosión eólica (aire) o la erosión por escorrentía (con las primeras lluvias o en los drenajes del riego).
- Incorporar *abonos verdes*, restos de cosechas o malezas para mejorar las condiciones físicas, químicas y biológicas del suelo.
- Hacer un uso racional de los *fertilizantes* sintéticos; en vez de ellos, aplicar abonos orgánicos (gallinaza, porquinaza, lombriabono, etc.), siempre que estén disponibles.
- Evitar la *quema* física de residuos o vegetación, porque deteriora la población microbiológica del suelo (Degiovanni, 2005).

Favoreciendo a los microorganismos del suelo

En el sistema de rizipiscicultura, algunos grupos microbianos colonizan las fracciones orgánica e inorgánica del suelo, según la función que cumplan en la transformación que realizan. Las principales funciones son la degradación de carbohidratos o de proteínas, la amonificación, la nitrificación, la oxidación, la reducción, la mineralización y la solubilización. Mientras algunos microorganismos actúan sobre un sustrato original, otros se desarrollan en los productos de transformación de los sustratos.

Terminada su función de *degradación de un sustrato*, los grupos microbianos que desarrollaban la acción principal la reducen al máximo o entran en latencia; en ese punto se incrementa la población de otro grupo, que cumplirá otras funciones de transformación. Cada proceso químico puesto en marcha por un microorganismo es una etapa en la descomposición de un material orgánico o inorgánico.

Bacterias

Son los microorganismos más abundantes y pequeños (0.1 a 1 micra de diámetro o de longitud; 1 micra = 1 millonésima de m). Pueden ser aerobias (que crecen con oxígeno), anaerobias (que crecen sin oxígeno) o facultativas (crecen con oxígeno o sin él). Algunas toleran un pH ácido (acidófilas), otras un pH básico (basófilas) y otras un pH neutro (neutrófilas). Algunas bacterias neutrófilas tienen la capacidad de neutralizar el suelo ácido en que se desarrollan para cumplir su función. Las bacterias que se alimentan de compuestos orgánicos son heterótrofas, y las que consumen compuestos inorgánicos son autótrofas. Las que se desarrollan a temperaturas intermedias (de 15 a 40 °C) son mesófilas, a temperaturas menores que 15 °C son psicrófilas, y a temperaturas mayores que 40 °C son termófilas. La mayoría de las bacterias del suelo son aerobias, mesófilas y heterótrofas.

Algunas bacterias producen endósporas y quistes latentes que les dan resistencia a las variaciones de temperatura, a los niveles extremos de pH y a la desecación del suelo. Este mecanismo les permite crecer más tarde cuando las condiciones del medio les sean favorables. Otras se protegen de la depredación y de la

desecación emitiendo una cápsula de sustancias mucoides. Otras se desplazan en la solución del suelo mediante un flagelo para encontrar más fácilmente el sustrato alimenticio.

Las bacterias tienen una importancia especial en la relación suelo–planta, porque son responsables del incremento o de la disminución de los *nutrientes disponibles* en el suelo. Un suelo agrícola sometido a la mecanización continua, al monocultivo, al riego, a la aplicación de agroquímicos y fertilizantes de síntesis química, a la compactación y a las quemas posee una flora microbiana muy escasa, lo que afecta negativamente su fertilidad.

Entre los géneros bacterianos más importantes desde el punto de vista agrícola, porque degradan compuestos orgánicos e inorgánicos y, por consiguiente, favorecen la nutrición de las plantas, están los siguientes: *Bacillus, Pseudomonas, Azotobacter, Azospirillum, Beijerinckia, Nitrosomonas, Nitrobacter, Clostridium, Thiobacillus, Lactobacillus* y *Rhizobium* (Delgado, 1995).

Actinomicetos

Estos microorganismos se parecen a los hongos y a las bacterias. Crecen en forma de micelio radial y producen conidias como los hongos, pero las características morfológicas de sus células son similares a las de las células bacterianas. Se encuentran en el suelo, en las aguas estancadas, en el lodo y en la materia orgánica en descomposición. Se nutren de materiales orgánicos (son heterótrofos). Degradan desde azúcares simples, proteínas y ácidos orgánicos hasta sustratos muy complejos constituidos por hemicelulosas, lignina, quitina y parafinas. De ahí su importancia en el proceso de transformación que termina en la producción del humus del suelo. Son considerados, además, como los mejores agregadores del suelo y son muy eficientes en la producción de sustancias húmicas.

En los suelos bien aireados, cuyo contenido de materia orgánica es alto, desarrollan poblaciones muy numerosas. Representan generalmente del 10% al 50% de la comunidad microbiológica del suelo. Se desarrollan bien en los suelos cuyo pH va de 5 a 7. Se reproducen por conidias, que son resistentes a las condiciones difíciles de temperatura, acidez y humedad. Esto les permite germinar cuando se restablecen las condiciones favorables para su desarrollo. Los actinomicetos se comportan muy bien en un suelo seco.

Algunos actinomicetos producen *antibióticos* que actúan sobre los microorganismos patógenos de las plantas. Si se agregan conidias de actinomicetos a un suelo contaminado con bacterias y hongos fitopatógenos, esas conidias se desarrollan y la población de células derivadas de ellas inhibe las poblaciones de los patógenos y regula el problema causado por éstas; finalmente, alcanzan un equilibrio que les permite establecerse, obtener nutrientes y continuar su desarrollo.

Los géneros de actinomicetos del suelo más importantes para la nutrición de las plantas son los siguientes: *Streptomyces, Nocardia, Frankia, Thermoactinomices, Micromonospora* y *Actinomyces* (Delgado, 1995).

Hongos del suelo

Constituyen una fracción importante de la biomasa microbiana total del suelo. Crecen en forma de red y extienden su micelio hasta cuando llega su estado reproductivo, en el que dan origen a esporas sexuales o asexuales. Son

degradadores aerobios importantes de material vegetal en descomposición en un medio ácido. Producen enzimas y metabolitos que contribuyen al mejoramiento de la estructura del suelo y a la transformación de otras sustancias orgánicas. Esas enzimas hacen parte también de la actividad de otros microorganismos. Los hongos metabolizan compuestos de muy difícil degradación, como las celulosas, las hemicelulosas y las ligninas; también degradan azúcares simples, alcoholes, aminoácidos y ácidos nucleicos. Pueden ser parásitos o saprófitos. Son muy importantes por la actividad que despliegan en los residuos de las cosechas. Su crecimiento ramificado rápido y su intensa actividad degradadora les permiten llegar a un equilibrio nutricional suelo–planta en los ecosistemas de cada cultivo.

Las raíces de las plantas están pobladas de hongos que aprovechan las exudaciones de la epidermis radical constituidas por azúcares, aminoácidos, ácidos orgánicos, nucleótidos, enzimas, vitaminas y sustancias de crecimiento. Por su parte, estos hongos movilizan nutrientes minerales hacia las raíces, aumentan la capacidad de la raíz para retener agua en la sequía, fijan nitrógeno y fósforo, y protegen las raíces de fitopatógenos —ya sea privándolos de espacio para crecer o emitiendo sustancias que los inhiben.

Los hongos son muy activos en las plantas que no pertenecen a las leguminosas porque no gustan de los azúcares que éstas segregan. Algunos hongos establecen una *simbiosis con las raíces*, conocida como micorriza. Los hongos micorrízicos son más activos en los suelos arenosos y son escasos en la materia orgánica. Esta simbiosis resulta favorecida por la pobreza mineral del suelo.

Los géneros de hongos más importantes asociados con las raíces de las plantas son*: Aspergillus, Penicillium, Rhizopus* y *Trichoderma*. *Aspergillus* y *Penicillium* movilizan el fósforo y el nitrógeno del suelo; *Trichoderma* sostiene la humedad de las raíces cuando hay sequía. Algunas levaduras son importantes fermentadoras de carbohidratos y producen alcoholes que son utilizados por otros organismos como fuente de energía; entre los géneros de levadura más importantes están *Saccharomyces* y *Rhodotorula* (Delgado, 1995).

Protozoarios del suelo

Los protozoarios son animales primitivos (de ahí su nombre), unicelulares, cuyas funciones son complejas aunque, al parecer, algunos tienen estructuras relativamente sencillas. En su mayoría, los protozoarios son microscópicos. Los géneros más comunes en el suelo son los siguientes: *Euglena, Amoeba, Colpoda, Vorticella, Halteria, Bodo* y *Naegleria*.

Las bacterias son la base de la *alimentación* de los protozoarios, que también ingieren pequeñas algas y levaduras. Ejercen, por tanto, los protozoarios un fuerte efecto selectivo en la composición bacteriana del suelo, lo cual se consideró, durante algún tiempo, muy perjudicial para la supervivencia de algunas bacterias y para el suelo; se pensaba, en efecto, que los protozoarios reducían la acción benéfica de las bacterias que mantenían la fertilidad del suelo. Actualmente se ha comprobado que algunas bacterias en cultivo actúan mejor en presencia de protozoarios depredadores que en su ausencia (Delgado, 1995).

Mediante el manejo del abonamiento nutricional

Los elementos nutritivos que se agregan al suelo (en abonos o enmiendas de

fertilización), pueden clasificarse funcionalmente en dos categorías:

- **Abonos de origen mineral.** Son los fertilizantes de síntesis química que se utilizan mucho en la agricultura convencional y se consiguen en el mercado bajo diferentes nombres y presentaciones. No pueden usarse en el sistema de rizipiscicultura.
- **Abonos de origen orgánico.** Son de origen zootécnico, y deben aplicarse en el sistema de rizipiscicultura porque sirven para mantener en equilibro la fauna microbiana del ecosistema arrocero respectivo. Se usan principalmente los siguientes:

Estiércol bovino o 'vacaza'
Este material es difícil de comparar con los demás aquí descritos, porque contiene muchos compuestos que se degradan lentamente. A causa de su peculiar maduración, la vacaza queda altamente polimerizada; por tal razón, es inatacable, en su mayor parte, por la microflora, y su descomposición se demora. Su función en el suelo es, principalmente, *estructural*.

El *efecto nutritivo inmediato* de la vacaza es relativamente pequeño, pero el efecto prolongado de este abono dura muchos años después de su aplicación. En general, este efecto nutritivo representa, al primer año de aplicado el abono, hasta el 30% del nitrógeno total presente en el suelo. Su *efecto nutritivo residual* es importante después de varios años de haber sido aplicado, y depende del tipo de suelo, del clima, de las labores practicadas, de los demás abonos que se apliquen, y de los cultivos (el arroz y los de rotación, en este caso) que se establezcan en el suelo en que se aplica la vacaza.

Respecto a sus nutrientes, el fósforo y el potasio son más asimilables para las plantas que los aportados por los fertilizantes de síntesis; el nitrógeno que contiene, en cualquiera de sus estados, debe sufrir las transformaciones bacterianas que garantizan su disponibilidad.

Estiércol porcino o 'porquinaza'
Es un abono muy variable en su composición. A pesar de esta inevitable variabilidad, es más fácil calcular la composición y el valor de fertilización de la porquinaza que del estiércol de bovinos, en razón del manejo que se da a estas deyecciones. Este abono puede ofrecer nitrógeno, fósforo y potasio, así como hierro, cobre, azufre y zinc (de los nutrientes menores) y todos en cantidades disponibles.

Estiércol de ovinos
Tiene propiedades típicas del estiércol bovino y de la gallinaza. Es el estiércol más rico en nitrógeno y potasio de todos los que se usan. Su efecto en la estructura del suelo es intermedio. Persiste en el suelo 3 años: el primer año se mineraliza aproximadamente el 50%, el segundo año el 35% y el tercer año el 15%. Es un material muy apreciado en horticultura y en fruticultura porque su respuesta agronómica es buena y no presenta problemas de manejo. Suele aplicarse como enmienda orgánica.

Estiércol de aves o gallinaza
Casi la totalidad del nitrógeno de este abono está disponible el primer año en que se suministra. Por tanto, su *eficacia es inmediata* y parecida a la de los fertilizantes de síntesis química. Su efecto residual se considera débil y su efecto estructural (en el suelo) prácticamente insignificante. Es un material muy difícil de manejar, por varias razones: no está estabilizado, no se distribuye fácilmente, está sujeto a fuertes pérdidas por volatilización de sus componentes, y tiene olor desagradable.

Lombriabono
Es el *abono ideal* para el sistema de rizipiscicultura. Se obtiene de la acción de las lombrices de tierra, que consumen todo material vegetal producido en una parcela y lo transforman en abono orgánico. Este abono contiene una buena cantidad de fósforo, nitrógeno, potasio, calcio, zinc y cobre.

La carne de las lombrices puede usarse como alimento para los peces (también para consumo humano), en especial si se trabaja con la lombriz californiana. Finalmente, las lombrices que mueren y se descomponen son de gran valor para el suelo porque le proporcionan nutrientes.

Efectos del abono orgánico
En general, las diversas ***fuentes de materia orgánica*** que se incorporan en el suelo causan varios efectos favorables en las propiedades químicas, físicas y biológicas del suelo; entre ellas, las siguientes:

- Aportan *nutrientes esenciales* para el crecimiento de las plantas, como nitrógeno, fósforo, potasio, azufre, boro, cobre, hierro, magnesio y otros elementos menores, durante el proceso de su transformación.
- Dan *actividad biológica* al suelo, porque incorporan en él ácidos orgánicos y alcoholes durante su descomposición. Estas sustancias sirven de fuente de carbono a los microorganismos de vida libre y a los fijadores de nitrógeno; estos últimos producen con ellas sustancias de crecimiento, como el triptófano y el ácido indolacético.
- Alimentan a los microorganismos descomponedores que producen *antibióticos*, los cuales protegen las plantas de enfermedades y contribuyen así a la sanidad vegetal del cultivo.
- Aportan al suelo *sustancias intermedias* como el triptófano y el ácido indolacético, producidas en su descomposición, las cuales pueden ser absorbidas por las plantas para acelerar su crecimiento. Sin embargo, cuando la materia orgánica es humificada (y no descompuesta) da más beneficios a las plantas.
- Favorecen la *estructura* del suelo; haciendo esto, mejoran el movimiento del agua y del aire en el suelo y disminuyen su compactación, lo que promueve el desarrollo de las raíces de las plantas y facilita luego la labranza del suelo.
- Aumentan la *capacidad tampón* del suelo, es decir, su resistencia contra las modificaciones bruscas del pH.
- Entregan al suelo *fenoles* y sustancias similares, las cuales intervienen en la respiración de la planta, en una mejor absorción del fósforo, y en la sanidad vegetal en general.
- Incrementan la capacidad de *retención de humedad* del suelo.

El estiércol de bovinos o vacaza, comparado con los fertilizantes químicos, es escaso en nutrientes; sin embargo, la cantidad de materia orgánica que aporta al suelo es muy importante por varias razones, principalmente porque mantiene la flora bacteriana residente en el suelo. Por su función en la estructura del suelo, contribuye a promover la agregación de las partículas terrosas y la estabilidad de los glomérulos de suelo que se formen.

Manejo integrado de arvenses

El manejo biológico de las malezas (especies arvenses) se vale de enemigos naturales que las atacan, específicamente ya sea ingiriendo su masa vegetal —como hacen las especies que se liberan en el cultivo (usualmente insectos, aunque también ácaros o nematodos)— o ya causándoles

enfermedades, como hacen los hongos fitopatógenos. En el pasado, casi toda la investigación sobre este campo se centró en las malezas dicotiledóneas; en años recientes, los investigadores han dirigido su atención a las especies monocotiledóneas, en particular para evaluar el control que pueden hacer de ellas algunos hongos patógenos (Evans, 1991).

No es difícil diseñar métodos para manipular los *enemigos naturales* de las malezas. El reto está en desarrollar suficientemente el método para poder integrarlo luego con otras prácticas de protección vegetal que se le han recomendado al agricultor. La comprensión de los elementos básicos de la ecología y de la dinámica de las poblaciones de herbívoros, es decir, de la interacción del agente de control biológico con la maleza, es una ciencia que se desarrolla rápidamente y que puede convertirse en un componente esencial de los métodos y estrategias del manejo integrado (Crawley, 1989).

La adopción del sistema de la rizipiscicultura permite poner en práctica varias alternativas viables para el manejo integrado de las malezas presentes en un cultivo de arroz, como se indica a continuación. Estas alternativas, junto con las medidas de manejo antes descritas, permiten obtener del sistema productos limpios y sostenibles.

Mediante el manejo del cultivo

Las principales *prácticas agronómicas* que contribuyen al manejo de las arvenses en el sistema de la rizipiscicultura son la rotación de cultivos, el uso de semilla certificada de arroz, la preparación adecuada del terreno, la limpieza de los canales de riego y drenaje, y la desyerba o 'despalille'.

Mediante el manejo del agua

Aunque algunas arvenses germinan debajo del agua, la mayoría no puede hacerlo; por tanto, si se mantiene, durante la mayor parte del ciclo del cultivo, una lámina de agua relativamente alta en los lotes de arroz, se inhibe en forma considerable la brotación y el crecimiento de estas arvenses.

La inundación de un campo de arroz con una lámina de agua de 2 a 3 cm de profundidad después del trasplante de las plántulas proporciona, de modo directo, un buen manejo de malezas gramíneas *Echinocloa colona*, *Ischaemum* sp. y *Rotboellia exaltata*. Los estudios hechos por Arai (1963) muestran que una lámina de agua de 15 cm detiene el crecimiento de las plantas de *E. colona* y la mayoría de ellas muere.

Por desyerba física o 'despalille'

La desyerba manual (erradicación o despalille)[1] es el método más común para controlar *E. colona* en los cultivos de arroz de los trópicos. Este método es, generalmente, muy efectivo, pero es muy lento y penoso, y ocupa mucha mano de obra.

En algunas regiones hay escasez de mano de obra para hacer el despalille y el costo de esta operación se eleva enormemente. Por tal razón, los herbicidas son a veces un medio más práctico y económico para el control de las malezas que la desyerba manual.

Trasplante

El establecimiento de un cultivo de arroz por trasplante es un requisito del sistema

1. Despalillar es un regionalismo propio de la costa norte de Colombia.

de rizipiscicultura. La práctica del trasplante consta de dos etapas bien definidas:

- **Semillero.** Se establece un sitio en que germinen las semillas de arroz, emerjan las plántulas y tengan éstas su crecimiento inicial. Para la construcción de un semillero se tienen en cuenta las recomendaciones siguientes:
  - ***Área:*** Para plantar 1 ha de arroz por el método de trasplante se necesita un semillero de 300 m^2 de área efectiva.
  - ***Ubicación:*** Construir el semillero tan cerca como sea posible del lote en que se hará el trasplante, con el fin de elevar la eficiencia de esta operación.
  - ***Suelo:*** Preparar bien la tierra del sitio destinado al semillero, nivelándola, si es posible, para que la humedad sea uniforme y se logre, por tanto, una germinación homogénea.
  - ***Tiempo:*** Dejar las plantas en el semillero alrededor de 20 días contados desde la germinación de las semillas.

- **Trasplante.** Es la operación de colocar (plantar) las plántulas de arroz en el terreno destinado al cultivo (Figura 5). Cuando las plántulas han iniciado la etapa de macollamiento, o sea, hacia los 20 días después de la germinación de las semillas, se puede iniciar el trasplante en el sitio definido para el cultivo.

  El sitio ha sido preparado previamente en seco y se ha mantenido luego bajo una lámina de agua, que permite manejar bien las malezas y facilita la operación de colocar las plántulas de arroz que se trasplantan.



Figura 5. Trasplante de plántulas de arroz en el campo.

Recomendaciones para hacer un buen transplante:

- ***Método:*** Puede hacerse a mano, colocando las plantas al azar o en hileras, y aprovechando así la mano de obra de los núcleos familiares; puede hacerse también con máquinas muy eficientes, pero este método no está muy difundido en Colombia.
- ***Distancias:*** En rizipiscicultura se trasplanta dejando de 20 a 25 cm entre los surcos y de 20 a 25 cm entre las plantas, y colocando de 1 a 2 plantas por sitio.
  Estas distancias facilitan la circulación de los peces en los lotes de arroz y les proporcionan un medio favorable para su desarrollo porque hay mejor aireación y más oxigenación del agua; además, ésta se refresca porque el espaciamiento impide que se eleve la temperatura.

Comparación entre el trasplante y la siembra directa

En rizipiscicultura se prefiere el método del trasplante al de la siembra directa de las semillas, por las siguientes razones:

- Respecto al *rendimiento*: aunque es alto con cualquiera de los dos métodos (con tal que se haga en ellos un buen manejo agronómico), el trasplante suele dar mayor rendimiento que la siembra directa.
- En *costos:* el costo de la mano de obra es mayor en el trasplante que en la siembra directa, pero el de los insumos es menor en el trasplante; por tanto, los costos de producción suelen ser iguales con ambos métodos.
- El trasplante permite producir *semilla* propia, porque con él se elimina todo tipo de planta atípica (cuya semilla contaminaría la del arroz en la cosecha). Para los pequeños productores, esta semilla buena representa una disminución en los costos de producción (cuando la compra de semilla certificada es muy onerosa).
- El trasplante permite manejar eficazmente el *arroz rojo*.
- El trasplante evita el efecto nocivo de la *salinidad* en el cultivo del arroz (donde haya suelos salinos), porque con él se mantiene una lámina constante de agua en el lote y, al momento de drenar, se hace un lavado muy eficiente del terreno como parte del manejo de las sales.
- El trasplante evita la dispersión o proliferación de las *enfermedades* porque, gracias a las distancias de siembra que requiere, favorece la circulación del aire entre las plantas, privando así a los microorganismos patógenos de mejor temperatura y de suficiente hidratación.
- El trasplante favorece el manejo de las *plagas* del arroz en la rizipiscicultura, porque permite que los peces circulen siempre cómodamente dentro del cultivo y entre las plantas de arroz (gracias a las distancias de plantación), donde hacen un control excelente de esas plagas.

Manejo integrado de plagas

Para implementar la rizipiscicultura como alternativa de producción limpia para las comunidades arroceras, es necesario elaborar un programa que contenga, además de algunas prácticas adecuadas de manejo del cultivo, las técnicas eficaces para el manejo de las plagas (principalmente de artrópodos dañinos). El objetivo final es la conservación del equilibrio natural de cada ecosistema arrocero.

Con buen manejo del cultivo

Se recomiendan, entre otras, las siguientes prácticas:

- **Rotación de cultivos.** Esta práctica es muy eficaz para manejar un buen número de plagas, porque rompe de manera natural su ciclo biológico.
- **Semilla certificada.** La siembra de esta semilla garantiza el vigor de las plantas y, por ende, su resistencia a las plagas.
- **Siembra oportuna.** Sembrar en fechas tales que permitan a las plantas desarrollarse a un nivel óptimo en los meses de mayor oferta ambiental, principalmente de brillo solar.
- **Inundación de los lotes.** Esta práctica es, en el arroz con riego, una forma rápida y económica de controlar la mayoría de las plagas, principalmente las que se encuentran en estado de larva.
- **Preparación adecuada del suelo.** Es una práctica de suma importancia en el arroz con riego. Hecha en época oportuna, expone las plagas (huevos, larvas, ninfas y aun adultos) al aire libre, donde son víctima de las condiciones ambientales adversas o son depredadas por las aves. Esta práctica destruye también los restos de la cosecha y las malezas, donde se hospedan temporalmente muchas plagas, y los incorpora al suelo, mejorando sus propiedades. (Lo mismo puede decirse respecto al sistema de secano.)
- **Establecer el cultivo por trasplante.** Esta práctica permite que el cultivo interactúe con las arvenses y con los insectos; de este modo influye en la abundancia y en la diversidad de la entomofauna asociada al sistema de rizipiscicultura. Al establecerse la cobertura vegetal natural y la introducida, habrá plantas hospederas para numerosos enemigos naturales. La cobertura natural comprende también algas verde-azules, azola y otros helechos.

Con manejo biológico acertado

En el sistema de rizipiscicultura hay una diversidad de agentes que controlan las plagas que atacan el cultivo del arroz. Los principales se agrupan en las tres categorías siguientes:

Predadores

Los *peces* de la rizipiscicultura cachama (*Colossoma macropomum*) y bocachico (*Prochilodus magdalenae*), por ejemplo, que pasan la mayor parte de su vida en el cultivo del arroz, controlan las larvas y adultos de insectos dañinos del arroz pertenecientes a tres géneros: *Spodoptera*, *Diatrea* y *Rupela*.

Los principales géneros de *insectos* que ejercen un control natural sobre los insectos plaga del arroz, son los siguientes: *Calosoma* sp., *Polistes* sp., *Polibia* sp., *Montina* sp., *Podlisus* sp., *Syrphidos* sp. y *Chrysopa* sp. (Figura 6). Finalmente, las aves y las arañas (Figura 7) son depredadores muy eficientes de los artrópodos dañinos.

Parasitoides

Siguiendo el esquema MIP (manejo integrado de plagas), se recomienda liberar parasitoides como *Trichogramma exiguum* y *Telenomus remus*, que controlan los huevos de los insectos



Figura 6. Coleóptero predador.



Figura 7. Araña predadora.

plaga *Spodoptera frugiperda, Diatraea* sp. y *Rupela albinella* (Figura 8). El medio en que se desarrolla la rizipiscicultura ofrece un control natural representado por cuatro especies parasitoides: *Erphosoma* sp., *Apanteles marginiventris, Lespera archipivora* y *Architas marmoratus*. Estos parasitoides mantienen las poblaciones de larvas y ninfas de los insectos plaga por debajo del umbral de daño económico.

Hongos entomopatógenos

Algunas especies de insectos plaga son muy susceptibles al ataque especifico de hongos microscópicos que les causan enfermedades (de ahí su nombre).

Estos hongos tienen un potencial epizoótico considerable, ya que pueden dispersarse rápidamente a través de una población y hacerla colapsar en pocas semanas. En el sistema de rizipiscicultura se liberan comúnmente los siguientes hongos:

- *Beauveria bassiana*: este hongo controla eficazmente varias chinches, el gorgojito de agua y algunas especies del género de insectos *Spodoptera* (Figuras 9, 10 y 11).
- *Metarhizium anisopliae:* por su acción amplia y por su capacidad para desencadenar epizootias, este patógeno es un agente de control fitosanitario muy eficaz y muy apreciado. Se emplea con mucho éxito en Cuba para el control del picudito acuático del arroz o gorgojito

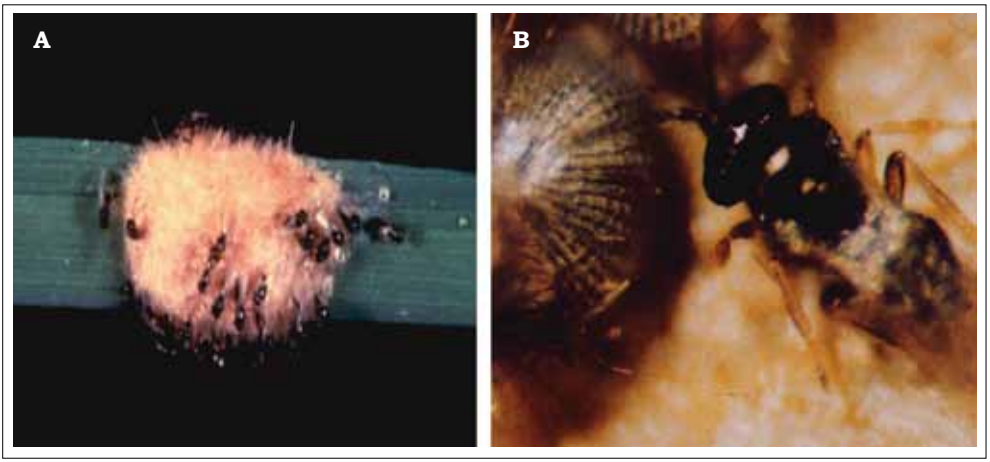


Figura 8. Control biológico de huevos de (A) *Spodoptera frugiperda* y (B) *Rupela albinella*. (Tomada de Meneses [2010]; Meneses et al. [2010]).



Figura 9. Chinche afectada por *Beauveria bassiana.*

FUENTE: www.hiddenforest.co.nz/fungi/family/clavicipitaceae/images/clavi10a.jpg



Figura 10. Gorgojito de agua afectado por *Beauveria bassiana.*

FUENTES: Meneses [2010]; Meneses et al. [2010].

de agua (Figuras 12,A y 12,B) y en Colombia para controlar algunas chinches.

- *Verticillium lecanii:* este hongo es efectivo en el control de plagas de homópteros como *Lissorhoptrus orysophilus*, y puede crear epizootias si la humedad y la temperatura le son favorables.

Manejo integrado de enfermedades

El manejo integrado de las enfermedades del arroz requiere cierta información sobre el tema, la aplicación de prácticas agronómicas apropiadas, y un control biológico acertado:

Con prácticas agronómicas

- Adquirir los *conocimientos* generales sobre patógenos agrícolas, por ejemplo, la sintomatología, los daños que causan, los factores que favorecen su proliferación.
- Sembrar *variedades* que tengan caracteres de tolerancia o resistencia a las enfermedades del arroz.
- Usar *semilla certificada* (práctica muy importante) porque la mayoría de los hongos que atacan el cultivo del arroz sobreviven en forma de micelio o de



Figura 11. *Beauveria bassiana* ejerciendo control sobre *Spodoptera* sp.

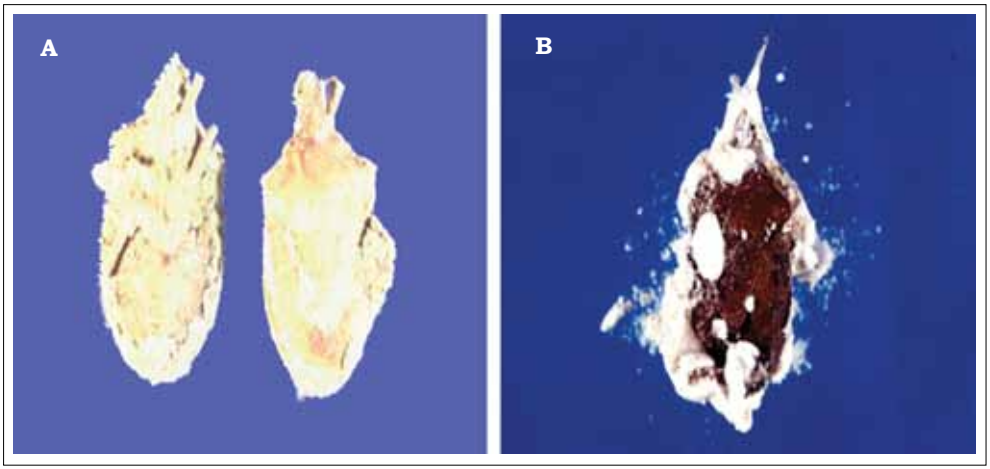


Figura 12. (A) Chinches parasitadas por *Metarhizium anisopliae*; (B) Gorgojito de agua parasitado por *Metarhizium anisopliae.* (Tomada de Meneses [2010].)

esporas sobre los granos cosechados y éstos, si se usan como semilla, transmiten las enfermedades.
- Hacer un *análisis de suelos* para programar un plan nutricional equilibrado y ajustado a las necesidades de cada cultivo; así evitará hacer aplicaciones excesivas de fertilizantes, especialmente de los nitrogenados, cuyo exceso (en tejidos suculentos) favorece el desarrollo de los organismos patógenos.
- *Preparar bien* el suelo para lograr dos propósitos:
  - destruir *esclerocios* (formaciones duras de resistencia) de los hongos patógenos, contribuyendo así a disminuir la incidencia y la severidad de las enfermedades fungosas;
  - ayudar a la planta de arroz a desarrollar un buen sistema de *raíces* que le confiera mayor capacidad de absorción de nutrientes y le garantice un crecimiento vigoroso.
- Hacer *nivelar* los lotes, tanto como sea posible, para que cuando sea necesario drenarlos, se eviten los charcos permanentes que pueden convertirse en foco de enfermedades.
- Evitar las poblaciones densas de plantas en los lotes porque proporcionan un *microclima* favorable para el desarrollo de las enfermedades.
- Hacer *rotación* de cultivos con especies no gramíneas, por ejemplo, con leguminosas.

Mediante el control biológico integrado

- Hacer un manejo adecuado de las plagas que causan *daños mecánicos* a las plantas (chinches, ácaros, sogata) porque el tejido dañado permite la entrada de una enfermedad.
- El hongo *Trichoderma harzianum* es la herramienta de control biológico del añublo de la vaina del arroz (piricularia de la vaina). El hongo puede descomponer los residuos de la cosecha y parasitar a *Rhizoctonia solani*. Algunas especies de *Trichoderma* son también antagonistas de otros

microorganismos (en especial, los hongos del suelo) que causan enfermedades en cultivos de importancia económica. Se aplican al suelo de los semilleros en forma preventiva. Su aplicación a un cultivo retarda, al menos, la aparición de las enfermedades fungosas.

- Conocer y preferir los *fungicidas registrados* y recomendados para el control de enfermedades, en especial los que incluyan en su composición elementos menores.
- Evitar los *daños físicos* que pueden causar a las plantas los productos agroquímicos (herbicidas, insecticidas), porque las áreas dañadas permiten la entrada de enfermedades.

Referencias bibliográficas

Arai, M. 1963. Theory of rice crop protection; I: Weed control. In: Matsubayashi, M.; Ito, R.; Nomoto, T.; Takase, T.; Yamada, N. (eds.). Theory and practice of growing rice. Fuji Publications, Tokio, Japón. p. 228-251.

Atencio, V.J. 2005. Impactos de la hidroeléctrica Urrá en los peces migratorios del río Sinú. Revista Temas Agrarios (Colombia) 5(5): 29-40.

Crawley, M.J. 1989. Insect herbivores and plant population dynamics. Annual Review of Entomology 34:531-564.

Degiovanni, V.M. 2005. Respuesta del arroz (*Oryza sativa* L.) variedad Oryzica 1 a la fertilización nitrogenada y a diferentes densidades de siembra en dos localidades arroceras del caribe colombiano. Revista Temas Agrarios (Colombia) 2:17-26.

Delgado, M. 1995. Los microorganismos del suelo en la nutrición vegetal. Plegable divulgativo. Investigación Orius Biotecnología, Villavicencio, Colombia. 6 p.

Evans, H.C. 1991. Biological control of tropical grassy weeds. In: Baker, F.W.; Terry, P.J. (eds.). Tropical grassy weeds. CAB International, Wallingford, R.U. p. 52-72.

FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación). 1957. Informe sobre cereales 1950-1956. Roma. p. 5-23.

Halwart, M.; Gupta, M. 2006. Cultivo de peces en campos de arroz. FAO, Roma. p. 27-29.

Meneses, R. [2010]. Manejo integrado de insectos plaga y un ácaro dañino del arroz. Instituto de Investigaciones del Arroz (IIArroz), de Cuba, y Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), Cali, Colombia. 132 p. (En impresión)

Meneses, R.; Gutiérrez, A.; García, A.; Antigua, G.; Gómez, J.; Correa, F.; Calvert, L.; Hernández, J. [2010]. Manejo integrado de plagas del arroz; guía para el trabajo de campo. Instituto de Investigaciones del Arroz (IIArroz), de Cuba, y Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), Cali, Colombia. 90 p. (En impresión)

138
blanca

PARTE B

Mejoramiento y Nueva Tecnología Genética

BLANCA

Capítulo 9

El mejoramiento del arroz[1]

Edgar A. Torres
César P. Martínez

Contenido

	Página
Resumen	142
Abstract	142
Introducción	143
Mejoramiento genético	144
Componentes y objetivos	144
Competencia	145
Sistemas o métodos de mejoramiento	146
Método masal ('bulk')	146
Método del retrocruzamiento	148
Método del retrocruzamiento limitado	148
Método genealógico o del pedigrí	149
Otras técnicas de mejoramiento	151
Mutaciones	151
Selección recurrente	152
Obtención de híbridos	153
Selección 'asistida' por marcadores	155
Cultivo de anteras	159
Mejoramiento genético de características agronómicas y morfológicas	160
Enanismo y tolerancia al volcamiento	160
Vigor vegetativo	161
Habilidad de macollamiento	162
Caracteres relacionados con la hoja	162
Caracteres relacionados con la panícula	164
Calidad del grano	168
Apariencia del endosperma	168
Longitud, forma y calidad de molinería del grano	169
Efecto del retraso de cosecha	171
Contenido de amilosa	171
Contenido de proteína	172

1. Este capítulo es una versión actualizada del capítulo "El mejoramiento de arroz", escrito por P.R. Jennings, W.R. Coffman y H.E. Kauffman del libro "Arroz: Investigación y producción", publicado por el CIAT en 1985.

Página
Mayor resistencia a las plagas 173
Importancia en los trópicos 173
Resistencia estable 173
Tolerancia de condiciones edáficas desfavorables 175
De la salinidad y la alcalinidad 175
De la toxicidad del hierro 176
De la deficiencia de zinc 176
Referencias bibliográficas 176

Resumen

Se describen e ilustran con ejemplos las principales ventajas y desventajas de los métodos más usados por los fitomejoradores en su esfuerzo por desarrollar variedades que respondan a las necesidades de los cultivadores, los molineros, los consumidores y los productores de semilla del sector arrocero regional y mundial. Las variedades modernas de arroz han sido desarrolladas empleando métodos de selección fenotípica, que no poco consideran su constitución molecular. Puesto que muchos factores limitantes de la producción de arroz están controlados por un buen número de genes, cada día es más difícil emplear la selección convencional para desarrollar mejores variedades. Por fortuna, los avances logrados en la biología molecular, en la genómica y en la informática hacen posible la combinación de los métodos tradicionales de mejoramiento con las herramientas moleculares (los genes marcadores), para elevar la eficiencia y la efectividad de los procesos de selección de plantas y de desarrollo de mejores variedades de arroz. El capítulo es apenas una introducción al extenso tema del mejoramiento vegetal moderno. Los principales temas tratados incluyen: mejoramiento genético; sistemas o métodos de mejoramiento (método masal, retrocruzamiento, retrocruzamiento limitado, método genealógico o del pedigrí); otras técnicas de mejoramiento (mutaciones, selección recurrente, hibridación, selección asistida por marcadores y cultivo de anteras); mejoramiento genético de características agronómicas y morfológicas; calidad del grano; mayor resistencia a las plagas; y tolerancia de condiciones edáficas desfavorables.

Abstract

Rice improvement

The main advantages and disadvantages of the methods most used by plant breeders in their attempt to develop varieties that respond to the needs of rice farmers, millers, consumers, and seed producers of the regional and global rice sector are described and illustrated with examples. Modern rice varieties have been developed using methods of phenotypical selection that little consider molecular structure. Because many of the factors limiting rice production are controlled by a large number of genes, it is increasingly difficult to use conventional selection methods to develop improved varieties. Fortunately, the advances made in molecular biology, genomics, and informatics allow traditional breeding methods to be combined with molecular tools (marker genes) to improve the efficiency and effectiveness of plant selection and development of improved rice varieties. The chapter is merely an introduction to the extensive topic of modern plant improvement. The main topics addressed include: genetic improvement; breeding systems or methods (bulk selection, backcrossing, limited backcrossing, pedigree method); other improvement techniques (mutation, recurrent

selection, hybridization, marker-assisted selection, anther culture); genetic improvement of agronomic and morphological characteristics; grain quality; greater pest resistance; and tolerance to unfavorable soil conditions.

Introducción

El objetivo primordial de un fitomejorador y su justificación como actor social es desarrollar variedades más productivas de especies cultivadas, que puedan ser adoptadas por la agricultura comercial. El éxito de un fitomejorador depende directamente de su habilidad para realizar las siguientes acciones: identificar las prioridades de su investigación con los factores que limitan la producción de un cultivo, definir sus objetivos, orientar correctamente sus actividades, y alcanzar las metas propuestas.

Los diversos problemas que limitan la producción de arroz en los trópicos obligan a los fitomejoradores a adoptar un *enfoque interdisciplinario* para encontrar soluciones. El científico ideal sería, ante todo, especialista en producción de arroz y, en segundo lugar, por ejemplo, agrónomo, fitomejorador, patólogo, entomólogo. Este equipo de investigación debe incluir también al agricultor; aunque muchas veces se omite su participación, su experiencia es una fuente de información práctica que le permite a los científicos orientar sus objetivos a problemas que no se encuentran, normalmente, en las parcelas experimentales.

El fitomejorador debe entender el ecosistema al que se dirigen las variedades mejoradas, los sistemas de producción empleados en él, y las dificultades que tenga allí la siembra comercial. Debe también comunicarse con los agricultores, porque es difícil para él/ella entender plenamente un resultado obtenido en las parcelas pequeñas de una estación experimental. Uno de los mejores medios de comunicación con el agricultor es el *ensayo en las fincas*, donde se prueban los mejores materiales obtenidos por el fitomejorador. Este ensayo tiene además las siguientes ventajas:

- Da información adicional al equipo investigador sobre la interacción genotipo/ambiente en las condiciones de la finca.
- Sugiere sitios para una serie de días de campo en que los agricultores vecinos pueden evaluar variedades y prácticas de cultivo nuevas que consideren adecuadas para ellos.
- Permite a los investigadores validar los resultados obtenidos en las parcelas experimentales, someter sus materiales a las condiciones reales de cultivo y difundir sus resultados con mayor rapidez.

El mejoramiento del arroz implica años de *trabajo constante* y difícil, donde los fracasos son muchos y los éxitos escasos. De 500 o más cruces, uno solo dará quizás origen a una nueva variedad que llegue a manos de los agricultores; por cada nueva variedad, decenas de miles de líneas fueron evaluadas y descartadas. No hay una forma fácil de mejorar la producción de arroz; esta labor exige paciencia, dedicación, continuidad y una entrega total, física y mental, al trabajo de campo. Los mejoradores del arroz que triunfan viven en compañía de sus plantas; los que delegan el trabajo pesado no obtienen resultados. Los acecha a todos, no obstante, la paradoja de que, en cuanto adquieren experiencia y son reconocidos por sus contribuciones, aumentan las

oportunidades y las tentaciones de dedicar su tiempo a actividades alejadas del campo. Todas sus privaciones serán finalmente recompensadas por la satisfacción de que la nueva variedad que obtuvieron será aceptada por los agricultores y los consumidores.

Es muy importante pensar en la formación de *nuevos fitomejoradores*. Debería existir, por tanto, un trabajo rotativo entre fitomejoradores con experiencia y nuevos investigadores, para que siempre haya personal idóneo y experimentado al frente de los programas de mejoramiento.

Mejoramiento genético

Componentes y objetivos

El fitomejoramiento dará buenos resultados si se tienen en cuenta cuatro factores principales, que representan además sus fines o propósitos:

- Identificar con precisión el *objetivo* ('target'), es decir, el área geográfica (en que se cultivará el arroz), el sistema de producción de arroz, y el mercado (del arroz producido).
- Definir claramente los *objetivos específicos* del trabajo.
- Disponer de suficiente *variabilidad* genética y de un *banco* de germoplasma bien mantenido y con accesiones bien caracterizadas.
- Disponer de una *metodología* adecuada, tanto en el campo como en el laboratorio, para poder identificar bien los genotipos superiores.

Un fin u objetivo amplio e impreciso —por ejemplo: *"Hacer mejoramiento para lograr alto rendimiento"*— producirá solamente frustraciones y fracasos. La pregunta pertinente, en este caso, sería: *"¿Qué factores limitan el rendimiento del cultivo?"* La respuesta incluiría seguramente uno o varios de los siguientes factores:

- Tallos débiles y volcamiento de la planta.
- Macollamiento deficiente.
- Panículas pequeñas.
- 'Autosombreado' de las hojas (las superiores dan sombra a las inferiores) debido a una morfología foliar imperfecta.
- Sensibilidad a problemas del suelo.
- Sensibilidad a las temperaturas bajas.
- Sensibilidad a la luminosidad restringida.
- Susceptibilidad al ataque de enfermedades o insectos.

La limitación del rendimiento puede deberse también a una combinación de éstos y otros factores. Una vez conocidos los *problemas básicos*, pueden establecerse los *objetivos específicos* del mejoramiento genético.

Una variedad nueva es aceptada por los productores, los molineros y los consumidores, si tiene las características específicas —tales como resistencia a factores ambientales adversos, buena productividad y tipo de grano— que son *preferidas* en el mercado (local o regional). Es más fácil cambiar las características del grano que determinan la calidad que alterar las preferencias humanas.

El conocimiento del control genético de un carácter es fundamental para el progreso de un programa de mejoramiento. Sin embargo, los fitomejoradores del arroz no tienen tiempo, generalmente, para hacer estudios genéticos adicionales. Cuando trabajan con un carácter de herencia desconocida, no pueden esperar los análisis genéticos para iniciar los cruzamientos y la selección. Se puede

inferir que esta *información genética* no es indispensable para el éxito del mejoramiento, como lo comprueban la extraordinaria labor de mejoramiento del arroz realizada por los agricultores en épocas pasadas, y las variedades mejoradas recientemente por los científicos dedicados a este cultivo.

A pesar de ello, la información genética sobre las formas de herencia y el cálculo de la heredabilidad hacen más efectivos tanto los procedimientos de selección como la formulación de los objetivos del mejoramiento. Si el fitomejorador desea obtener esta información, un requisito fundamental es la utilización de poblaciones relevantes para el programa de mejoramiento. Las conclusiones derivadas de poblaciones adecuadas para un estudio genético, pero no adaptadas a las condiciones de cultivo o no utilizadas en el programa de mejoramiento, serán de poca utilidad.

Competencia

Las plantas de arroz de las generaciones segregantes tempranas compiten intensamente entre sí. Esta competencia es un factor crítico en la elección de un sistema de mejoramiento genético. La habilidad competitiva del arroz está relacionada negativamente con su valor agronómico, cuando en el área sembrada hay un control razonable del agua. La altura de las plantas, principalmente, hace que sean más competitivas las de menor valor productivo; por su parte, las competidoras débiles rinden más cuando se cultivan como líneas puras en condiciones normales. Las tasas diferenciales de crecimiento y el tamaño de las plantas vecinas hacen que las plantas pequeñas emitan pocas macollas, produzcan tallos débiles y delgados, tengan menor producción de biomasa, presenten un envejecimiento prematuro en sus hojas, y muestren una notoria esterilidad.

Objetos de competencia

El arroz compite principalmente por *luz*; esta competencia empieza temprano, en la etapa de macollamiento, y su intensidad aumenta en proporción al crecimiento de la planta y a la densidad de siembra del cultivo. Aumenta además por el espaciamiento corto, por la duración y la intensidad de la época lluviosa, por la acción de las malezas, y por otros factores que reducen la penetración de la luz en el dosel.

La competencia por *nitrógeno* puede presentarse en las etapas de crecimiento posteriores al macollamiento, pero puede superarse agregando un fertilizante al suelo. Ahora bien, el N añadido agrava la competencia por luz, puesto que estimula el crecimiento de las plantas y, por consiguiente, la altura de la planta.

Efectos en poblaciones

El efecto de la competencia en las poblaciones segregantes depende de la divergencia genética de los progenitores y del tipo de cruzamiento realizado. Por ejemplo:

- En un *cruzamiento simple*, cuya variabilidad es muy grande, es difícil identificar y seleccionar las plantas deseables en la F_2, incluso cuando no están sujetas a competencia. Esta dificultad aumenta en los cruces de 'línea alta x línea enana'. Cuando la competencia se extiende hasta que el grano madure, el proceso de selección llega a ser casi imposible, pues la mayoría de las plantas que serían muy deseables reciben tanta sombra, que se vuelven parcialmente estériles o desarrollan anormalidades; esta situación hace parecer inservibles a las sobrevivientes, que son (erróneamente) descartadas.
- En el *retrocruzamiento simple* o en el *cruzamiento de tres líneas*, dos tipos de cruzamiento en que hay menos variabilidad, es posible hacer una

selección previa respecto a la altura y al tipo de planta en la F_1, con el fin de eliminar las plantas de arroz altas y frondosas. Las plantas enanas que se seleccionen aquí individualmente producen en el campo familias F_2 que son enanas homocigotas o que segregan respecto a la altura de la planta. La competencia no afecta mucho estas familias F_2 enanas, que son homogéneas, pero afecta a las familias que segreguen como altas y enanas (en la proporción 3:1) y a las poblaciones F_2 de los cruces simples.

Los efectos de la competencia se pueden reducir de dos maneras:

- En las plantas F_2, con las siguientes prácticas: dejando espaciamientos amplios, no aplicando N, y eliminando las plantas altas y frondosas antes de hacer la selección. Ahora bien, las dos primeras no son satisfactorias porque reducen el tamaño de las plantas genéticamente altas.
- En los cruzamientos simples y en los retrocruzamientos que involucren progenitores altos y enanos, la siguiente práctica es muy útil:
  - Inspeccionar las plantas cuando comienza la floración y cortar a ras del suelo, bajo el nivel del agua, los fenotipos altos.
  - Hacer una segunda ronda después de que hayan florecido todas las plantas, y eliminar las plantas altas que hayan quedado del primer corte.
  - Hacer avanzar (o 'avanzar') luego a la generación F_2 en el campo, únicamente las plantas enanas, para obtener así poblaciones muy uniformes en cuanto a su altura.

Cuando se desee obtener plantas de altura intermedia, la práctica de eliminar plantas de mayor altura requiere de una supervisión estricta del fitomejorador, aunque esta práctica no es tan satisfactoria como en el primer caso.

Es importante no confundir la habilidad competitiva con la selección por adaptabilidad, ni hacer que la una sea equivalente de la otra; esto puede ocurrir en poblaciones mejoradas que se cultiven en ambientes donde las temperaturas bajas presenten problemas y las condiciones edáficas sean desfavorables.

Sistemas o métodos de mejoramiento

Los textos de fitomejoramiento describen detalladamente los procedimientos básicos, las ventajas y las desventajas de los tres sistemas de mejoramiento más utilizados: el masal, el de pedigrí y el de retrocruzamiento. Se discutirán entonces en este capítulo las características de estos sistemas que se relacionen específicamente con los programas de mejoramiento de arroz. Otros métodos de mejoramiento, como la selección recurrente y el avance generacional rápido, se aplican en ciertos casos al arroz y, por ello, también se describen en este capítulo.

Método masal ('bulk')

El método de selección masal no ha permitido lograr avances importantes en la productividad del arroz tropical porque los científicos agrícolas, en general, no han sido plenamente concientes de dos principios básicos del mejoramiento del arroz:

- La influencia de la *morfología de la planta* en la capacidad de ésta para dar rendimiento y, en consecuencia, la necesidad de reemplazar los fenotipos altos y frondosos por otros más productivos cuyo tipo de planta sea diferente y mejor.

- El efecto perjudicial de la *competencia* en las poblaciones segregantes, cuya consecuencia directa es la pérdida de segregantes valiosos.

Los fitomejoradores que han reconocido las interacciones entre el tipo de planta, la habilidad de la planta para dar rendimiento, y la competencia de las plantas han terminado, en su mayoría, evitando completamente, o modificando, el sistema masal convencional. Actualmente se acepta que el mejoramiento masal (en 'bulk') sin restricciones es inútil si el objetivo es aumentar el rendimiento de cruzamientos que segregan ampliamente respecto al tipo de planta.

Ahora bien, un *método masal modificado* tiene buenas posibilidades para el mejoramiento del arroz. En tal sistema se seleccionarían una o dos panículas de cada una de las mejores plantas de cada población a partir de la generación F_2. Se sigue aplicando la selección masal hasta la F_4 o la F_5, generación en que las plantas superiores se seleccionan y se purifican; posteriormente, la evaluación continúa por el sistema de pedigrí. La selección masal modificada es, probablemente, más satisfactoria que la selección genealógica o de pedigrí, cuando el cultivo se encuentra en un área en que se obtiene una productividad moderadamente baja. Por ejemplo, en los programas de mejoramiento de arroz de secano enfocados a combinar la tolerancia de la sequía, de las enfermedades y de las condiciones adversas del suelo.

El sistema masal modificado fue empleado con éxito, desde el final de la década de los 70 y durante los años 80, por el programa de mejoramiento de arroz del CIAT; se dieron los pasos siguientes:

- El objetivo inicial fue exponer las generaciones segregantes a *condiciones naturales* que favorecieran la infección de enfermedades como piricularia y hoja blanca, en los Llanos Orientales de Colombia (CIAT, 1979).
- Posteriormente, surgió la idea de producir *poblaciones masales* heterogéneas empleando el método de selección masal modificado, para acumular factores de resistencia a piricularia, y producir poblaciones genéticamente diversas pero con tipo de planta semienano (Martínez, 1985).
- Luego se utilizó el método en América Central, donde se combinó con la selección en sitios contrastantes, para buscar resistencia a enfermedades secundarias y adaptación a las condiciones locales.

El resultado de este intenso trabajo fue la obtención de muchas variedades comerciales; por ejemplo, Oryzica 1, Oryzica 2, Oryzica 3, Oryzica Caribe 8, Araure 4, Fonaiap 1, Palmar, ICTA Motagua, Panamá 1048 y Panamá 3621. Se demostró así que el método masal modificado puede ser útil para manejar poblaciones segregantes de arroz no sólo en los ecosistemas aptos para el arroz de secano sino también en los cultivos con riego.

El método masal modificado tiene una *desventaja*; no permite hacer evaluaciones tempranas de la resistencia a sogata, de la calidad del grano y de otras características, evaluaciones que serían la respuesta a problemas muy limitantes del cultivo. Esta desventaja puede superarse manejando la F_2 por el sistema de pedigrí, en el que se evalúan plantas individuales por familia o por cruce, y procediendo luego a hacer avanzar las plantas seleccionadas, que se someten a selección masal modificada hasta la quinta generación.

Método del retrocruzamiento

Este método permite transferir un carácter de herencia simple a una variedad mejorada, la cual se usa repetidas veces como progenitor recurrente. Los fitomejoradores del arroz han empleado el retrocruzamiento, aunque en menor grado que otros métodos. La principal desventaja del método es que ninguna variedad está tan cerca del ideal que sólo necesite perfeccionar un solo carácter para ser mejorada.

El retrocruzamiento convencional es muy útil para responder a ciertos problemas específicos. Uno de ellos es la resistencia del arroz a los *herbicidas de control total*; éste es un carácter de alto valor comercial porque permite controlar, en un cultivo de arroz, las malezas de la misma especie o grupo taxonómico. Los siguientes resultados se han obtenido con este método:

- En la Universidad de Louisiana se desarrolló una variedad de arroz resistente a los herbicidas del grupo de las imidazolinonas utilizando mutación química (Croughan, 2003).
- Investigadores de la Federación de Arroceros de Colombia (Fedearroz) emplearon el método del retrocruzamiento convencional para transferir esa resistencia a la variedad Oryzica Yacú 9; así desarrollaron la variedad CF 205, que fue aprobada para uso comercial en Colombia en el 2005.
- Investigadores del Instituto Riograndense del Arroz (IRGA), en Brasil, desarrollaron, empleando el retrocruzamiento convencional y el mutante mencionado anteriormente, y partiendo del cultivar IRGA 417, la variedad IRGA 422CL, que es resistente a los herbicidas antes mencionados.

En los tres casos se definieron claramente varios aspectos fundamentales: el objetivo del trabajo; la herencia del carácter (la resistencia, en este caso, está controlada por un gen simple); y la metodología de selección, que discrimina con precisión los genotipos resistentes.

Método del retrocruzamiento limitado

En general, los fitomejoradores desean tener alta variabilidad genética en sus poblaciones; sin embargo, en algunos casos, esta condición no es lo adecuado. Cuando se hace un cruzamiento simple entre progenitores muy divergentes —por ejemplo, entre uno enano y otro alto y frondoso— se producen segregaciones muy amplias; por ello, y dado el tamaño reducido de las poblaciones que se emplean en estos trabajos, es difícil identificar segregantes útiles en la generación F_2. En consecuencia, se recurre al procedimiento de hacer uno o dos retrocruzamientos al progenitor cuyo tipo de planta es bueno, o sea, al progenitor adaptado. Es decir, se prefiere el método del retrocruzamiento limitado porque en él se logra una reducción positiva de la variabilidad genética presente en la población.

Reducir la variabilidad genética en una población tiene ventajas. La apariencia de la F_2 de un cruzamiento simple es una ilustración bastante acertada del valor del retrocruzamiento. En ocasiones, la F_2 de un cruce simple produce pocos segregantes deseables, mientras que la F_2 de un retrocruzamiento es excelente. Esto indica que si se hacen uno o dos retrocruzamientos hacia el progenitor adaptado o de buen tipo de planta, se obtienen una segregación adecuada y una recombinación suficientemente amplia, que darán muchos segregantes en los que las características de la planta y de los granos serán superiores a las

respectivas características de los progenitores recurrentes.

El éxito de un retrocruzamiento está directamente relacionado con el tamaño de la población BC_xF_1 investigada y con la intensidad de selección aplicada a la población. El procedimiento para obtener un número adecuado de plantas (seleccionando, en este caso, respecto a la altura de la planta) es el siguiente:

- Se producen, generalmente, de 100 a 150 (a veces más) semillas en el retrocruzamiento.
- Se siembra la BC_1F_1, y se descartan las plantas que sean altamente estériles, de maduración tardía, de poco macollamiento y cuyas panículas sean pequeñas o tengan granos de forma o tamaño deficiente.
- En algunos programas de mejoramiento, se hacen avanzar a la F_2 las plantas altas que exhiban características aceptables, junto con las mejores plantas enanas.
- De cada familia F_2 se cultivan de 200 a 400 plantas; las familias F_2 que se derivan de las plantas altas de la F_1 retrocruzadas, segregan en plantas altas y enanas en una proporción de 3:1.
- Las plantas altas se desechan, para reducir la competencia y asegurar la supervivencia de las enanas deseables.

Para evitar la evaluación de las plantas altas en la F_2, un procedimiento sencillo es obtener un número mayor de semillas en la F_1, o sea, de 150 a 200, y hacer avanzar a la F_2 únicamente las plantas enanas, fértiles y de buen grano.

El método del retrocruzamiento limitado ha sido empleado con éxito en la *introgresión*, en el arroz cultivado, de caracteres útiles del arroz silvestre. Las especies silvestres del género *Oryza*, especialmente las que portan el genoma AA, como *Oryza rufipogon*, son fuente de caracteres útiles en el mejoramiento del arroz. En la década de los 90, el programa de mejoramiento de arroz del CIAT cruzó las especies silvestres *O. rufipogon, O. barthii* y *O. glaberrima* con las variedades comerciales BG90-2, Oryzica 3 y Caiapo, con el fin de ampliar la base genética del arroz cultivado en América Latina (Martínez et al., 2006). Se hicieron de dos a tres retrocruzamientos hacia las variedades comerciales antes de iniciar el proceso de formación de familias y la selección. Se han obtenido los siguientes resultados de esos cruces:

- Respecto al *rendimiento*: varias líneas BC_2F_6 del cruzamiento BG90-2/ *O. rufipogon* rindieron más que el progenitor (el 'parental') recurrente, en ambientes específicos.
- Respecto a las *enfermedades* fungosas: varias líneas avanzadas BC_2F_5 del cruzamiento Oryzica 3/ *O. rufipogon* demostraron tolerancia de la enfermedad rizoctoniasis (*Rhizoctonia* sp.), y algunas de ellas se están cruzando con progenitores élite para producir nuevas variedades comerciales.
- Respecto a la adaptación a *ecosistemas*: por lo menos una línea derivada del cruzamiento Caiapo/ *O. glaberrima* está cerca de ser liberada como nueva variedad para las condiciones de secano de Nicaragua; para condiciones similares, en Bolivia, se está considerando la liberación de un genotipo derivado del cruzamiento Oryzica 3/*O. rufipogon*.

Método genealógico o del pedigrí

El método del pedigrí (= 'pata de grulla', francés antiguo, por la forma del registro genealógico en el papel) ha sido el más usado y el que ha tenido más éxito en el mejoramiento del arroz, aunque todavía tiene algunos inconvenientes, entre ellos los siguientes:

- Consume mucho *tiempo*, porque deben evaluarse periódicamente las líneas durante la época de cultivo y hay que mantener bien los registros en que se basa la selección que se hace al llegar la madurez del cultivo; ahora bien, dado que cada planta seleccionada se maneja de manera independiente, el material para evaluar crece en forma piramidal y la carga de trabajo se incrementa de manera considerable.
- Es muy *laborioso*, porque cada selección se debe preparar no solamente para su siembra en el campo, sino también para su evaluación en el laboratorio y en viveros especiales respecto a la calidad del grano, a la resistencia a enfermedades e insectos dañinos y a otros caracteres.
- Exige un *conocimiento* muy estrecho (familiaridad) del material investigado y de los efectos del genotipo y del medio ambiente en la expresión del carácter en cuestión; es mucho mayor esta exigencia que en los demás métodos.
- Un requisito esencial para que los resultados sean buenos es (como en todo método de mejoramiento) la acertada elección de los *progenitores*.

Sin embargo, las muchas ventajas del método del pedigrí explican el uso extenso que ha tenido. Pueden destacarse las siguientes:

- Las *generaciones tempranas* del material que se selecciona en el campo pueden evaluarse en pruebas especiales respecto a caracteres como la resistencia a factores adversos y ciertas características del grano (apariencia y contenido de amilosa).
- Los programas de *computador* ('software') disponibles facilitan enormemente el trabajo de manipular la información, mantener los registros y manejar los libros de campo.
- Es posible descartar *genotipos indeseables* y concentrarse en el material útil porque la información obtenida proporciona una base sólida para hacerlo. Por ejemplo:
  - Los datos de la evaluación de las progenies de plantas individuales se reciben mientras las nuevas líneas de pedigrí crecen en el campo; las líneas que, por ejemplo, resulten de mala calidad o sean susceptibles a plagas, se *eliminan* inmediatamente de los libros de campo para no perder tiempo con ellas.
  - El fitomejorador puede conocer el comportamiento de un carácter mejorado volviendo, mediante los registros del pedigrí de generaciones previas, a los surcos en que se hizo la selección. Esta información temprana le permite *predecir*, hasta cierto punto, ese comportamiento en un vivero de campo.

En ocasiones, alguna de estas pruebas falla y da resultados inciertos. Para reducir este riesgo, es esencial que el criterio de selección empleado en el método del pedigrí sea estricto. Hay que aplicar, por tanto, las siguientes reglas:

- Rechazar las líneas que no sean *satisfactorias* respecto a uno o más caracteres fundamentales. El objetivo es aumentar la eficiencia del método. No se deben mantener líneas de inferior calidad pensando que darán plantas deseables en la próxima generación, algo que rara vez ocurre en la práctica. En el arroz, la mayoría de los caracteres importantes se fija en las generaciones tempranas. Es preferible concentrar la actividad y el esfuerzo en los materiales más valiosos.
- Retrasar la selección respecto a *caracteres cuantitativos* hasta las

generaciones avanzadas. La selección por el método genealógico es, a veces, inefectiva respecto a esos caracteres porque dependen más que otros de la dominancia genética y de la interacción genotipo/ambiente. En las generaciones avanzadas, en cambio, hay poca variación dentro de las líneas y es posible evaluar repeticiones en varios ambientes.
- Hacer selección estricta en generaciones tempranas respecto a caracteres controlados por *genes mayores*. Al mismo tiempo, el fitomejorador debe mantener cierta variabilidad que le permita lograr avances en la selección que haga, en generaciones avanzadas, respecto a algún carácter cuantitativo.

Otras técnicas de mejoramiento

Mutaciones

Existe actualmente la tendencia, especialmente entre investigadores que desconocen la variabilidad natural, de proponer la inducción de mutaciones en el arroz como fuente de variabilidad de una característica. Una revisión de literatura sobre el mejoramiento genético del arroz por mutación muestra que la mayor parte de ese trabajo se ha hecho para inducir *caracteres comunes* que abundan en la naturaleza, como el tallo corto, la precocidad, el tamaño del grano, la resistencia al desgrane o un número alto de macollas. No se justifica la inducción de mutaciones —empleada como fuente adicional de caracteres en sustitución de las prácticas convencionales de mejoramiento— cuando la mayoría de las fuentes naturales no haya sido aún explotada.

Si se hace una evaluación realista de las prioridades de mejoramiento basadas en las necesidades de la industria arrocera y de los consumidores de arroz, se hallaría lo siguiente: el mejoramiento genético por mutación es, en general, más *perjudicial* que benéfico durante los primeros años del programa de mejoramiento de una región, tanto en la zona intertropical como en las zonas templadas. Las mutaciones inducidas deberían hacerse exclusivamente en *programas bien establecidos*, muy productivos y que hayan agotado la mayoría de las fuentes naturales de caracteres. Por ejemplo, la inducción de tallos sólidos, de resistencia a los herbicidas, de endospermo amarillo o de glumas frágiles (como las del trigo) sería una contribución extraordinariamente valiosa al mejoramiento del arroz

Los siguientes caracteres fueron logrados por mutaciones y han tenido un gran valor comercial:

- En 1979 se obtuvo en Estados Unidos la variedad semienana Calrose 76 aplicando rayos gamma a la variedad Calrose. La variedad mutante, cuyo enanismo es controlado por un gen recesivo similar a sd_1 (dgwg), ha dado rendimientos de 9 t/ha y ha sido usada en varios programas de mejoramiento para producir nuevas variedades semienanas de mayor potencial de rendimiento (Chao, 1993).
- El caso más relevante de resistencia a herbicidas por mutación es la variedad de arroz resistente al grupo de las imidazolinonas. Fue obtenida (de manera independiente) en la Universidad de Louisiana (Croughan, 2003) y en el Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA), de Argentina (Livore, 2006).
- Se han obtenido también resultados interesantes, aunque están aún en un nivel experimental, en la búsqueda de arroz resistente al herbicida glifosato mediante mutaciones (Zhou et al., 2006).

Selección recurrente

La selección recurrente se ha empleado también en el mejoramiento del arroz. En forma general implica los siguientes pasos:

- Formación de una población base, que puede originarse en cruzamientos biparentales o involucrar varios progenitores.
- Desarrollo de algún tipo de progenie derivada de esa población, como medios hermanos, familias S_1 o simplemente plantas individuales.
- Evaluación de estas progenies para los caracteres objetivo, en uno o varios ambientes.
- Selección de las progenies superiores de la población utilizando el promedio de un carácter o un procedimiento más sofisticado, como un índice de selección que incluya varios caracteres.
- Recombinación de las progenies seleccionadas para dar origen a la población mejorada.
- Repetición de este proceso durante varios ciclos.

Este método, que se aplica al mejoramiento de especies de polinización cruzada, procura aumentar la frecuencia de los *alelos favorables* en una población. Tiene mucha utilidad para el mejoramiento de caracteres cuantitativos, porque en las especies autógamas (especialmente en el arroz) existen ciertas desventajas en relación con las especies alógamas:

- Hay poca recombinación después de un cruzamiento porque el sistema reproductivo funciona por autopolinización.
- Siendo además una especie diploide, en la que se utilizan principalmente cruzamientos biparentales, el número de alelos diferentes en la población segregante es pequeño.
- Las fuertes presiones de selección y el tamaño efectivo reducido de las poblaciones manejadas conducen, frecuentemente, en el arroz a la deriva genética, y ésta trae consigo la pérdida de alelos valiosos.

Casos
El programa de mejoramiento de arroz del CIAT ha utilizado el método de la selección recurrente con varios objetivos:

- En 1982 se fijó el objetivo de aumentar la *recombinación* entre factores genéticos provenientes de diversas fuentes de resistencia a piricularia y, para lograrlo, se propuso emplear la fuente de androesterilidad IR36 en un programa de selección recurrente; en éste se utilizó un esquema de selección masal fenotípica que comprendía los pasos siguientes (CIAT, 1982):
  - el cruzamiento de 19 materiales con la fuente de androesterilidad;
  - la siembra de la generación S_0 en la estación experimental La Libertad (del ICA, en los Llanos Orientales de Colombia), donde había una alta presión de enfermedades;
  - la selección de plantas S_0 fértiles; y
  - posteriormente, la recombinación, mediante la cosecha de las plantas S_1 estériles.
- Más tarde (década del 90) se fijó el objetivo de *ampliar la base genética* del arroz cultivado. Para lograrlo, se desarrollaron varias poblaciones, tanto para el sistema con riego como para el de secano —entre ellas, PCT-6 y PCT-8 (Martínez et al., 1997). Estas poblaciones sirvieron de base para el desarrollo de nuevas poblaciones, y algunos cultivares se han obtenido de estas últimas.

Manejo de poblaciones

El manejo de las poblaciones de arroz obtenidas por selección recurrente requiere de *metodologías* y conceptos un tanto diferentes de los que se emplean en el mejoramiento convencional de ese cultivo; entre otras, las siguientes:

- En la recombinación de las progenies seleccionadas es posible utilizar cruzamientos manuales, pero es más práctico servirse de un sistema natural que garantice la esterilidad masculina al hacer el cruzamiento.
- Para crear una buena población, deben identificarse progenitores que estén adaptados tanto respecto al sitio (adaptación espacial) como a la época del cultivo (adaptación temporal).
- Sería deseable, además, tener previamente información acerca del valor de los genes que transmite a la progenie cada progenitor para asegurarse de que la futura población tenga un promedio y una varianza genética altos para los caracteres de interés; estos valores son fundamentales para lograr un progreso genético en este método.
- Es necesario utilizar un tamaño poblacional efectivo adecuado, para reducir la pérdida de alelos valiosos que ocurriría por la deriva genética debida al muestreo.

El proceso de evaluación, selección y recombinación puede manejarse de diferentes maneras, es decir, pueden utilizarse varios esquemas que combinen, en forma diferente, unidades de selección y de recombinación. Lo fundamental, sin embargo, es emplear un esquema de selección que permita lograr lo siguiente:

- Aprovechar un porcentaje alto de la varianza genética aditiva.
- Evaluar adecuadamente las progenies dejando intervalos cortos entre los ciclos de selección.

Por otro lado, se piensa que los métodos de mejoramiento convencionales, como el genealógico (o del pedigrí), son poco eficientes para mejorar en el arroz los *caracteres cuantitativos* controlados por muchos genes, con efecto pequeño y altamente influenciados por el ambiente. No obstante, el mejoramiento convencional, en el que se reciclan constantemente las líneas élite, es un proceso cíclico similar a la selección recurrente y ha producido excelentes cultivares de arroz.

Obtención de híbridos

Los fitomejoradores buscan activamente formas alternas de mejoramiento para responder a la necesidad de incrementar constantemente el potencial de rendimiento del arroz. Una de estas alternativas es el uso del vigor híbrido, a través de la heterosis que se presenta cuando se cruzan dos líneas homocigotas genéticamente distintas.

Los híbridos de arroz han mostrado regularmente ventajas en rendimiento sobre las mejores variedades convencionales, que se calculan entre un 15% y un 20% (Virmani, 2005). Este mayor rendimiento ha sido atribuido a varias causas. Entre éstas, un incremento en la producción de *materia seca*, porque en el híbrido aumenta el área foliar y es mayor la tasa de crecimiento del cultivo; y un *índice de cosecha* mayor, que resulta de un mayor número de granos por panícula y de un aumento en el peso de los granos (Virmani, 2005).

El arroz híbrido posee también mayor estabilidad y resistencia a dos tipos de estrés: el biótico y el abiótico.

Estrategias
Para producir híbridos que sean utilizados como cultivares comerciales, los fitomejoradores de arroz deben cambiar sus metodologías y estrategias. Se sugieren los cambios siguientes:

- A diferencia del mejoramiento convencional, el objetivo fundamental del proceso ya no es el comportamiento de la línea *per se*, sino lograr el máximo nivel de *heterosis* cuando ésta se cruza con otra (u otras) líneas.
- Asimismo, y debido al sistema reproductivo del arroz, es fundamental la existencia de esterilidad masculina que permita producir, de manera práctica, la semilla híbrida. Actualmente existen tres sistemas, siendo el más utilizado el de las tres líneas (A, B y R), llamado también sistema genético–citoplasmático.
- En tercer lugar, en el desarrollo de líneas debería darse más importancia, en la expresión de la heterosis del arroz, a la dispersión de los *alelos favorables* entre los progenitores que a la dominancia genética, cuya relevancia puede ser menor en una especie autógama como el arroz.
- Finalmente, es necesario hacer un gran número de *cruzamientos de prueba* ('test crosses'), pues éstos permiten identificar la calidad de los genes que la línea pura trasmite a sus progenies y la forma en que estos genes interactúan con los genes de otros progenitores.

Los cruzamientos de prueba no se usan mucho en el mejoramiento convencional del arroz, pero son decisivos en la obtención de híbridos, por varias razones:

- Permiten identificar genotipos que pueden transformarse en nuevas líneas mantenedoras o utilizarse como restauradores en nuevas combinaciones híbridas.
- Permiten identificar combinaciones de líneas que producen híbridos con alta heterosis.
- Permiten identificar patrones heteróticos, o grupos de líneas que producen alta heterosis cuando se cruzan con otros grupos de líneas.
- Son indispensables para identificar líneas de buena capacidad de combinación que se deben avanzar.
- Son la clave para mantener la pureza de las líneas androestériles.

Todo este trabajo requiere bastante mano de obra, suficientes recursos y mucha dedicación de los fitomejoradores.

Dificultades
El mejoramiento y producción de híbridos de arroz comerciales presenta algunas dificultades, por ejemplo:

- Los híbridos de arroz tienen heterosis positiva para la *altura de planta*, y por esta razón son más susceptibles al vuelco que las variedades convencionales.
- El grano producido por un híbrido es *semilla* F_2, que segrega y esto limita el desarrollo de híbridos que tengan suficiente heterosis para el rendimiento; y calidad del grano tal que lo haga aceptable en el mercado. Sin embargo, estas características pueden mejorarse haciendo cruzamientos y selección como lo muestran varios híbridos comerciales liberados recientemente en los Estados Unidos.
- Para desarrollar híbridos comerciales competitivos, el programa debe invertir recursos considerables en la fase de evaluación de rendimiento final (testing, en inglés), que incluya un gran número de ambientes y permita predecir adecuadamente el comportamiento de materiales en campos de producción.

- La mayor dificultad se encuentra en producir semilla híbrida a un *costo razonable*, pues el sistema reproductivo del arroz no está adaptado a la polinización cruzada, y las cantidades de semilla obtenidas en campos comerciales son pequeñas.

Programas institucionales
Varias instituciones de América Latina han establecido programas de mejoramiento de arroz para desarrollar híbridos comerciales.

- En Brasil, el programa de híbridos de la Empresa Brasilera de Investigación Agropecuaria (Embrapa) se inició en 1984 y llevó a cabo dos iniciativas interesantes:

  – emplear el carácter del estigma largo, obtenido de la especie *Oryza longistaminata*, para incrementar el porcentaje de polinización cruzada;
  – utilizar el método de selección recurrente recíproca para producir líneas mantenedoras y restauradoras (Neves y Rangel, 1994).

  Este programa obtuvo híbridos experimentales cuyo rendimiento fue superior al de las variedades comerciales, varias líneas mantenedoras y algunas líneas restauradoras (Neves y Rangel, 1994); sin embargo, no se obtuvieron híbridos comerciales.

- En Colombia, la Federación de Arroceros de Colombia (Fedearroz) inició un programa de híbridos de arroz en 1983 y obtuvo los siguientes resultados de sus investigaciones:

  – varias líneas mantenedoras del IRRI proporcionaban niveles adecuados de heterosis cuando eran cruzadas con variedades comerciales colombianas, pero los cruces tenían dos defectos: carecían de resistencia a las principales plagas y enfermedades que limitan el rendimiento en el país, y su grano no era de buena calidad;
  – se identificaron algunos genotipos que podían convertirse en mantenedores, y éstos se encontraron, principalmente, entre las variedades denominadas 'criollas' que pertenecen al grupo Japónica tropical;
  – igualmente, se identificaron líneas con la capacidad de restaurar la fertilidad; éstas se hallaron principalmente entre las variedades comerciales del grupo Índica, como CICA 8, Oryzica Caribe 8 y Oryzica 1.

  Este programa logró también combinaciones híbridas experimentales cuyo rendimiento superó el de las variedades convencionales (Muñoz, 1994; Holguín et al., 1998).

A pesar de estos buenos resultados, ambos programas fueron abandonados.

Recientemente, el IRGA, en Brasil, y otras instituciones, como el CIRAD, en Francia, han recuperado el interés por la investigación de híbridos de arroz, y han obtenido resultados muy interesantes (Rosso et al., 2006).

Selección 'asistida' por marcadores

La biotecnología y, especialmente, los marcadores moleculares, son una herramienta que complementa el mejoramiento convencional del arroz y puede aportarle grandes beneficios al cultivo. El marcador molecular se define como un fragmento de ADN que se encuentra en una posición especifica del

genoma y puede ser utilizado para señalar la posición de un gen en particular. La selección 'asistida' (o auxiliada) por marcadores se vale de éstos como 'marcadores de genes' (o 'marcadores genéticos'), es decir, como instrumentos para señalar o confirmar la presencia de genes específicos o de combinaciones de genes que confieren un fenotipo deseado (por ejemplo, la resistencia a alguna enfermedad o la resistencia a un insecto dañino). Es entonces un método de *selección indirecta*, en el que la asociación entre el marcador y el gen de interés es fundamental para sustituir el tamizado fenotípico o para ayudar a realizarlo.

Ventajas y condiciones

Entre sus ventajas y beneficios están los siguientes (Xu et al., 2005):

- Reduce el tiempo que se requiere para obtener un genotipo deseado.
- Permite incorporar, de manera efectiva y eficiente, caracteres de interés en genotipos adaptados.
- Permite mejorar, específicamente, caracteres difíciles de evaluar y de baja heredabilidad.
- Es un método más simple comparado con el tamizado fenotípico.
- Permite realizar la selección en estado de plántula, especialmente en el arroz, antes del trasplante.
- Es más confiable, pues los marcadores no están expuestos a los efectos ambientales y es posible discriminar entre genotipos homocigotos u heterocigotos.

La selección asistida da buenos resultados, si se tienen en cuenta, principalmente, los factores siguientes:

- Los caracteres bajo selección poseen valor comercial y la selección fenotípica ha demostrado ser poco efectiva.
- Existe un mapa genético con un número adecuado de marcadores polimórficos.
- Hay un ligamiento estrecho entre los marcadores y los genes de interés.
- Ocurre una recombinación adecuada entre los marcadores y el resto del genoma.
- Hay capacidad en el programa de mejoramiento para evaluar un número grande de plantas, analizar de manera conjunta los datos moleculares y fenotípicos, y tomar decisiones; de manera que la evaluación sea efectiva respecto a su costo y al tiempo que requiere.

Estrategias

La selección asistida por marcadores implica inicialmente un *esfuerzo* considerable en la identificación de marcadores asociados al carácter de interés antes de que éstos sean utilizados de manera rutinaria en un programa de mejoramiento. Ese esfuerzo comprende actividades como las siguientes:

- Desarrollar *poblaciones genéticas* para estudiar la herencia de los caracteres de interés (un trabajo necesario en la mayoría de los casos); estas poblaciones, diseñadas previamente con ese fin, son poblaciones F_2, haploides dobles (DH, en inglés), líneas recombinantes endogámicas (las RIL, en inglés), entre otras. En ellas se ha elevado al máximo el polimorfismo entre los progenitores y el desequilibrio de ligamiento.
- Evaluar las *progenies* desarrolladas para los caracteres de interés, preferiblemente en varios *ambientes*, con el fin de establecer la influencia que tienen los genes y el ambiente en la expresión del carácter (o los caracteres) que interesa(n).
- Establecer la *huella genética* de estas progenies con un número adecuado de marcadores distribuidos de forma adecuada en el genoma.

- Realizar un análisis de *ligamiento* para establecer la segregación de los marcadores y calcular luego la localización de éstos en el mapa genético.
- Identificar *asociaciones* significativas entre el promedio del carácter y el genotipo del marcador, utilizando metodologías como el análisis de regresión, el mapeo de intervalo simple, el mapeo de intervalo compuesto, y otras.
- Hacer (en ciertos casos) un *estudio más detallado* que se denomina 'mapeo fino' para identificar marcadores estrechamente ligados con el carácter, y minimizar así el error causado por la recombinación entre los marcadores y el(los) gen(es) de interés.
- Insertar, finalmente, el procedimiento de selección asistida en el programa de mejoramiento; para lograrlo, se necesita establecer una *rutina de evaluación* con los marcadores moleculares que sea confiable y de bajo costo, y que produzca información en el menor tiempo posible.

Recientemente, se han propuesto *nuevas estrategias* para encontrar asociaciones entre marcadores y caracteres de interés que podrían aplicarse en los programas de mejoramiento convencionales:

- Una de ellas es el '*mapeo por asociación*', que hace uso de la asociación no aleatoria entre alelos situados en diferentes loci (o desequilibrio en el ligamiento, LD); es el resultado de todos los eventos de recombinación que han ocurrido desde el origen de un alelo por mutación, en una población, con el fin de encontrar asociaciones entre marcadores y caracteres de interés (Zhu et al., 2008). En este caso se emplean las poblaciones desarrolladas rutinariamente por los programas de mejoramiento (Parisseaux y Bernardo, 2004), las colecciones de germoplasma y el material de los viveros (Malosetti, 2006), en vez de las poblaciones F_2, haploides dobles o RIL (ver antes) para el mapeo de genes. Este mapeo tiene las siguientes ventajas:

  – hay mayor resolución, es decir, más eventos de recombinación han ocurrido en la historia de la población;
  – se estudia un mayor número de alelos segregantes en la población, en vez de dos alelos en las poblaciones biparentales;
  – se emplea menos tiempo en la investigación (Zhu et al., 2008).

Pueden aparecer, sin embargo, falsos positivos debido a la estructura de la población; además, para un fitomejorador, el empleo de esta estrategia con germoplasma no adaptado puede ser de poco valor (Bernardo, 2008).

Esta estrategia sería muy útil en un programa convencional de mejoramiento en que se desarrollen cientos de líneas al año, que luego serán evaluadas extensivamente en múltiples ambientes (Arbelbide et al., 2006).

De cualquier forma, el fitomejorador debe centrar su interés en el desarrollo de cultivares que hayan sido mejorados a través de la introgresión o la selección de esos bloques de genes favorables, y no debería enfocarse tanto en el simple descubrimiento de nuevos QTL y en el reporte que haga de éstos (Bernardo, 2008).

Empalme con mejoramiento

La combinación entre los métodos de mejoramiento convencional y la selección asistida por marcadores se puede realizar utilizando varios esquemas; pueden mencionarse los siguientes:

- ***Retrocruzamiento asistido*** por marcadores (MAB). El objetivo de este método o esquema es transferir un carácter específico a un progenitor recurrente. En cada generación BC_xF_1, la selección se realiza en dos fases: inicialmente para el(los) marcador(es) asociado(s) al gen de interés proveniente del donador; y posteriormente para otros marcadores asociados al genoma del progenitor recurrente. Las plantas que porten el gen de interés y tengan la mayor cantidad proporcional del genoma del progenitor recurrente se cruzan nuevamente con el progenitor recurrente; luego se continúa el proceso. Las ventajas principales del método son las siguientes:

  - se hace una selección efectiva del locus que interesa al investigador;
  - se minimiza el arrastre de genes no deseados;
  - se acelera la recuperación del genoma del donante; y
  - se reduce el tiempo requerido para obtener el producto deseado.

- ***Acumulación sucesiva*** de genes ('piramidación'). Este método se emplea para combinar, en un mismo genotipo, varios genes, los cuales confieren, generalmente, resistencia a diversas enfermedades o razas de un patógeno. El método consta de los siguientes pasos:

  - se cruzan donantes de genes de interés con un mismo genotipo receptor o se cruzan entre ellos;
  - se obtienen luego líneas fijas (utilizando cultivo de anteras o SSD), y en éstas se identifican (usando marcadores moleculares) las que poseen los genes de interés;
  - más adelante, estas líneas son entrecruzadas, autofecundadas y seleccionadas en forma sucesiva, hasta acumular en un mismo genotipo todos los genes de interés.

- ***Selección con marcadores*** en generaciones tempranas: en este caso, la selección asistida se utiliza como herramienta para mejorar la eficiencia de la selección practicada mediante un método convencional, como el pedigrí. La selección con los marcadores se hace en una generación temprana, como la F_2 o la F_3, donde se identifican, y se hacen avanzar a la siguiente generación, las plantas que porten los alelos deseables; el objetivo aquí es fijar los caracteres de interés.

  Entretanto, las plantas que exhiban combinaciones de genes no deseadas son eliminadas; de este modo, los recursos del programa se concentran en unos pocos genotipos valiosos.

Caracteres de genes múltiples

Las metodologías mencionadas anteriormente se emplean actualmente en varios programas de mejoramiento para manipular los genes mayores o los QTL que explican una parte proporcionalmente grande de la varianza de la población.

Los caracteres complejos controlados por muchos genes o muchos QTL, que son de efecto pequeño y están altamente influenciados por el ambiente, son más difíciles de manipular. Por esta razón, pocos programas emplean en este trabajo la selección asistida. Sin embargo, se han propuesto varios métodos en que interviene dicha selección, por ejemplo:

- ***Incremento de alelos*** favorables en poblaciones F_2. La selección asistida es utilizada, en este caso, para aumentar la frecuencia de líneas recombinantes que posean, en las generaciones avanzadas de endogamia, la mayor cantidad de alelos favorables (Bernardo, 2008). La población base es la generación F_2

derivada, ya sea de cruzamientos simples, retrocruzamientos limitados o cruzamientos de tres o cuatro líneas. En esta generación se eliminan todos los individuos que sean homocigotos para los marcadores asociados con la disminución del carácter; entretanto, las plantas restantes son sometidas a autofecundación hasta obtener la homocigosis. De esta forma, en la población de líneas recombinantes aumenta la frecuencia esperada de individuos homocigotos para todos los alelos que incrementen el carácter deseado, los cuales tendrán promedios de valor superior (Bernardo, 2008).

- ***Selección recurrente asistida*** por marcadores (MARS). El método contempla ciclos múltiples de selección asistida por marcadores seguida de una o varias recombinaciones, con el fin de aumentar la frecuencia de los alelos favorables en la población y de desarrollar, simultáneamente, líneas fijas de comportamiento superior (Bernardo, 2008). El método consta de los siguientes pasos:

  - identificar con marcadores moleculares las plantas F_2 o las progenies derivadas $F_{n:2}$, que posean los alelos estudiados, para incrementar el carácter deseado en todos o casi todos los loci o los QTL que sean objeto de selección;
  - a partir de estas plantas o progenies, se desarrollan líneas recombinantes endogámicas;
  - estas líneas se entrecruzan más adelante para obtener la población mejorada, en la que se hace de nuevo la selección asistida;
  - el proceso se repite hasta realizar dos a tres ciclos más (Bernardo, 2008).

Proyectos institucionales

Varios programas de mejoramiento están empleando la selección asistida por marcadores de manera rutinaria, especialmente para mejorar características de calidad del grano y de resistencia a enfermedades; se mencionan los siguientes:

- El programa de mejoramiento de arroz de la Universidad de Arkansas utiliza el método de pedigrí junto con selección asistida para mejorar el contenido de *amilosa* del grano y la resistencia del arroz a la enfermedad *piricularia*. Para el contenido de amilosa emplean el marcador RM 190 descrito por Bermang et al. (2001); para la piricularia emplean los marcadores RM 208 (gen *Pi-b*), AP5659-1 (gen *Pi-z*), y Pi-indica junto con el SNP YL183 (gen *Pi-ta*). Las poblaciones base son las familias F_3, en las cuales se evalúan siete plantas por familia en forma masal y se eliminan las familias homozigotas respecto al bajo contenido de amilosa o a la susceptibilidad a la enfermedad. La extracción del ADN se hace en las semillas y para la lectura del polimorfismo se utiliza un secuenciador automático (Boyett et al., 2007).
- El programa de arroz del CIAT está desarrollando un método de selección asistida por marcadores respecto al *añublo* o *piricularia*; el objetivo es transferir a materiales élite los genes Pi1(t), Pi2(t) y Pi33(t), que confieren resistencia a las razas de *Piricularia grisea* predominantes en América Latina (CIAT, 2006).

Cultivo de anteras

Los fitomejoradores de arroz han desarrollado nuevos métodos de mejoramiento con el objetivo de aumentar la *eficiencia de la selección*. El

cultivo de anteras es uno de tales métodos y con él se busca producir rápidamente líneas fijas provenientes de un cruzamiento. El procedimiento es el siguiente:

- Las anteras de plantas F_1 se colocan en un medio apropiado, donde las células de polen haploides producen tejido no diferenciado (callo).
- Se agregan al medio las hormonas apropiadas, y el callo sostenido en él regenera plantas.

Aunque algunas de esas plantas pueden ser haploides, en otras tantas ocurre una duplicación espontánea de los cromosomas y se obtienen plantas diploides normales. La estructura genética de la población de haploides dobles es similar a la que se obtiene mediante la descendencia de una semilla única, pero la aventaja en que su producción tarda menos tiempo (Mackill et al., 1996).

El programa de mejoramiento del CIAT ha hecho bastante uso del cultivo de anteras y ha obtenido buenos resultados (algunos relevantes, como el primero que se menciona a continuación):

- Produjo germoplasma tolerante a *temperatura bajas* y con buena *calidad* de grano, que provenía de cruzamientos entre algunos genotipos chilenos y la variedad americana Lemont (CIAT, 1987).
- Produjo germoplasma para los ecosistemas de *secano,* con el fin de acelerar la ampliación y la diversificación de la *base genética* del arroz en América Latina, y de facilitar la elaboración de mapas de marcadores moleculares de genes de importancia económica (Lentini et al., 1997).

Si se hace selección en líneas haploides dobles, que sean homocigotas, se pueden lograr dos resultados con este método: mayor ganancia genética —porque se aprovecha en su totalidad la varianza aditiva— y mayor heredabilidad—porque los efectos de la dominancia no existen. Otras dos ventajas tiene el uso del cultivo de anteras (Lentini et al., 1997):

- El tiempo necesario para obtener una línea fija se reduce de 3 a 1½ años.
- La metodología es sencilla y se puede adoptar fácilmente por un programa de mediana capacidad.

Hay, sin embargo, limitaciones en el uso del cultivo de anteras porque no todos los genotipos responden a él de igual manera. En general, las variedades del grupo Japónica, tanto templado como tropical, responden mejor que los genotipos del grupo Índica (Lentini et al., 1997). Por tal razón, el cultivo de anteras de variedades de tipo Japónica da muy buenos resultados (Mackill et al., 1996).

Mejoramiento genético de características agronómicas y morfológicas

Enanismo y tolerancia al volcamiento

El acame o volcamiento temprano de los tallos largos y delgados de un cultivo de arroz es un fenómeno que altera la distribución de las hojas en las plantas, aumenta así la sombra que unas hojas hacen a otras, interrumpe el trasporte de nutrientes y de fotosintatos, causa esterilidad en la planta, y reduce finalmente el rendimiento. Los tallos cortos, gruesos y fuertes son el carácter de la planta que más resiste el volcamiento (o vuelco); además, estos tallos determinan las siguientes características:

- Una relación proporcional grano/paja favorable.

- Una buena respuesta al N.
- Una reducción en pérdidas respiratorias en los tallos.
- Una alta capacidad de rendimiento.

Desafortunadamente, facilita también el ataque de patógenos como *Rhizoctonia* sp.

La resistencia de la planta de arroz al volcamiento está entonces relacionada directamente con la poca altura de la planta, aunque depende también de *otros caracteres* como el diámetro del tallo, el espesor de las paredes y el grado en que las vainas de las hojas se adhieren a sus entrenudos. Ahora bien, el fitomejorador no puede evaluar fácilmente en el campo esas características anatómicas ni la adherencia de la vaina al tallo, pero puede, por ejemplo, aplicar niveles altos de N y observar la altura y el grosor que adquieren los tallos en respuesta al fertilizante. Existen materiales de arroz semienanos que son susceptibles al vuelco y hay también genotipos de altura intermedia y de tallos fuertes y flexibles que lo toleran.

Las *condiciones ambientales* en que se haga la selección (respecto al volcamiento) influyen también en la tolerancia de este fenómeno que exhiban los materiales estudiados. Las líneas desarrolladas en condiciones de secano o las trasplantadas en el sistema con riego muestran mayor susceptibilidad al vuelco que aquellas cuyo avance generacional se realiza en condiciones de siembra directa con semilla seca o en el sistema de pregerminado.

Vigor vegetativo

El vigor vegetativo inicial es una característica de la planta que le permite llenar rápidamente los espacios entre plantas y entre surcos en el terreno en que crece. El carácter es deseable si no conduce a un crecimiento excesivo de la planta y, por ende, a la sombra ('sombreado') que se hacen mutuamente las hojas después de que empiezan a formarse las panículas. El vigor vegetativo se da en asociación con otros caracteres, por ejemplo:

- Emergencia y desarrollo rápido de las plántulas.
- Desarrollo precoz y un número considerable de macollas.
- Hojas moderadamente largas e inicialmente flácidas.
- Aumento temprano y rápido en la altura de las plántulas.

Los niveles de vigor vegetativo y las variedades de arroz que los demuestran son los siguientes:

- *Nivel bajo:* se da en los materiales moderadamente cortos, de escaso macollamiento; entre ellos, las variedades de los Estados Unidos y de Surinam, y la mayoría de las variedades de secano y del grupo Japónica.
- *Nivel alto inicial:* ocurre en algunas variedades altas, de pocas macollas y adaptadas a la siembra directa; en las variedades tropicales no mejoradas cuyo follaje suele ser excesivo en la floración y son demasiado altas y propensas al acame.
- *Nivel excelente:* se observa en varios tipos enanos del grupo Índica, incluyendo las variedades CICA 4, INTI y CICA 8, en las que se combina con flacidez inicial de las hojas, hábito erecto de la planta adulta, y una tasa de crecimiento lenta después de que la planta alcanza el área foliar crítica.

El *momento* en que se evalúan los materiales respecto a este carácter, varía del modo siguiente:

- La evaluación debería realizarse de 40 a 50 días después de la germinación, cuando se observen diferencias claras

en el vigor inicial de las plantas, en los viveros en que se aplica el método del pedigrí.
- Más de 50 días después de la germinación de la semilla, en áreas poco cálidas o que sean deficientes en N.
- La evaluación debería iniciarse en la F_3, se anota el vigor de cada línea y se siguen evaluando hasta los ensayos de rendimiento, aunque es difícil evaluar el vigor de las plantas individuales.

Habilidad de macollamiento

Si la habilidad de la planta para producir muchas macollas se combina con la disposición de los tallos en un arreglo semicompacto, las macollas reciben mucha más radiación solar y, por consiguiente, el sombreado mutuo de las hojas por unidad de superficie no es tan grave. El macollamiento abundante se prefiere al intermedio o al escaso en las variedades mejoradas porque, siendo éstas semienanas en su mayoría, no tienen un índice de área foliar óptimo y el número alto de macollas no conduce, por tanto, a un crecimiento excesivo de la planta y al sombreado mutuo de sus hojas.

Si la densidad de siembra es alta, las variedades que macollan profusamente formarán más tallos por planta, y darán una producción mayor de grano que las variedades de escaso macollamiento. Un buen número de macollas compensará las plantas que se pierdan cuando la densidad de siembra sea baja; esta plasticidad de respuesta no la tienen las variedades cuya habilidad de macollamiento es limitada. Ahora bien, un *macollamiento excesivo* puede implicar la producción de tallos no productivos y sería, entonces, indeseable.

El mejoramiento de plantas de buen tipo y con una gran habilidad de macollamiento es relativamente sencillo y ha presentado los siguientes resultados:

- Si se reduce el tamaño de la planta (menor altura), su capacidad de macollamiento no disminuye, generalmente y, en algunos casos, puede aumentar.
- Si en un cruzamiento hay un progenitor de buen macollamiento, los segregantes obtenidos macollan bien casi siempre.

El macollamiento abundante, como objetivo de mejoramiento, requiere especial cuidado cuando se hace siembra directa. Existe evidencia empírica contundente de que ocurre una selección natural contra el buen macollamiento en las poblaciones avanzadas en este sistema de siembra y, eventualmente, se producen genotipos de bajo macollamiento. Esta pérdida puede contrarrestarse del modo siguiente:

- Sembrar con densidad baja la F_2 para facilitar la identificación de las plantas que macollan abundantemente.
- Hacer luego una selección estricta respecto a una gran habilidad de macollamiento.
- Cuando sea posible, utilizar periódicamente el sistema de trasplante en la F_2 y las parcelas de observación.

En todo caso, hay que tener en cuenta que un macollamiento excesivo puede conducir a un crecimiento exuberante y, en consecuencia, al *sombreado mutuo* de las hojas, lo que finalmente limitará el rendimiento.

Caracteres relacionados con la hoja

Hoja erecta

El carácter genético más importante de la hoja es su posición erguida después

de la iniciación de la panícula, el cual está asociado con una alta capacidad de rendimiento. Las hojas erectas permiten que penetre mucha *luz solar* en el follaje y que se distribuya en él adecuadamente, lo que trae consigo un incremento de la fotosíntesis (Yoshida, 1981). Hay razones teóricas y pruebas experimentales evidentes de que la fotosíntesis de un cultivo de arroz alcanza un nivel óptimo, cuando las plantas combinan hojas superiores cortas y erectas con hojas inferiores gradualmente flácidas y más largas (Yoshida, 1981).

Longitud, anchura y grosor de la hoja
La longitud de las hojas es variable en un cultivo de arroz. Por otra parte, el ángulo que forma la hoja con el tallo está asociado directamente con su longitud; por ejemplo, las hojas cortas tienen una *distribución* más uniforme, de tal suerte que la sombra que se harían mutuamente es menor, lo que les permite utilizar la luz con más eficiencia. En consecuencia, las hojas angostas contribuyen a aumentar el rendimiento de grano de la planta.

El grosor de la hoja ha sido relacionado con la capacidad de rendimiento alta, porque está asociado con una tasa fotosintética mayor que la de una hoja delgada, por unidad de área foliar. Sin embargo, algunas variedades muy productivas tienen hojas relativamente delgadas. Estas observaciones sugieren que esta característica no tiene una relación directa importante con el potencial de rendimiento.

Rigidez, color y senescencia de la hoja
La *rigidez* de las hojas es deseable únicamente en áreas en que hay vientos intensos que las desgarran y las parten. Este carácter parece estar asociado directamente con el grosor de la hoja y con la lignificación de los tejidos foliares.

El *color* verde oscuro de las hojas está asociado, según algunos investigadores, con una buena capacidad de rendimiento, aunque la asociación no es muy clara. Por ejemplo:

- Fedearroz 50 tiene un potencial de rendimiento excelente y mantiene las hojas de color verde oscuro durante todo el ciclo del cultivo.
- Epagri 108, en cambio, es igualmente muy productiva y, sin embargo, sus hojas son de color verde pálido.

Entretanto, existen cuatro tipos de *senescencia* retardada y sólo dos de ellos son funcionales. Esto indica que existen fenotipos 'stay green' que pueden ser cosméticos y este carácter no se relaciona con el rendimiento.

Algunos fitomejoradores opinan que la senescencia lenta de las dos o tres hojas superiores de la planta es deseable porque, teóricamente, mantiene activa la *fotosíntesis* y permite así que el grano alcance su madurez completa. Además, en esas plantas la sanidad de las hojas es mucho mayor que en las plantas corrientes. En el CIAT se han estado seleccionando líneas de arroz que presenten esas dos características de las hojas: senescencia lenta y sanidad hasta el momento de la cosecha.

Hay que tener en cuenta que la senescencia lenta es el resultado de un *equilibrio* entre la conservación del aparato fotosintético y la degradación de proteínas requerida para el llenado del grano. Cuando no hay N disponible, la planta necesita degradar las proteínas de las hojas; por consiguiente, para que haya senescencia lenta, es muy importante que la planta continúe absorbiendo *N* hasta la etapa final del llenado del grano; el sistema radical desempeña aquí, por tanto, un papel clave.

Hojas glabras
Las hojas y las espiguillas de la mayoría de las variedades de arroz son pubescentes, y sólo las de unas pocas variedades son glabras, es decir, tienen pocos tricomas bicelulares o no tienen ninguno. Ahora bien, ninguna variedad de arroz tiene hojas pubescentes y glumas lisas, o viceversa.

Las variedades glabras no irritan la piel de los cultivadores durante la cosecha, el desgrane, el secamiento y la molinería; por consiguiente, la condición de planta glabra es bastante deseable. Por otro lado, las hojas, espiguillas u otras partes de las plantas que no tengan pelos (lisas) no están, aparentemente, asociadas con el potencial de rendimiento o con la reacción de la planta al ataque de insectos o enfermedades. Hay variedades enanas glabras o lisas, de buen comportamiento, que son preferibles al material proveniente de los Estados Unidos; algunas están disponibles en el IRRI.

Hoja bandera
La hoja bandera es importante en relación con la capacidad de rendimiento de la planta, porque suministra los productos de la fotosíntesis directamente a la panícula. Ayuda también a estabilizar el rendimiento reduciendo el daño ocasionado por los pájaros, ya que una hoja bandera erecta y moderadamente larga protege bastante bien el grano maduro. La hoja bandera de las variedades altas rara vez cubre totalmente la panícula.

La longitud y la rigidez de la hoja bandera son variables. Muchas variedades enanas tienen hoja bandera corta y erecta; en otras, esta hoja es larga y flácida y las hojas inferiores son cortas y rectas. Así pues, parece que el tamaño de la hoja bandera es independiente del tamaño de las hojas más bajas.

Algunos investigadores chinos sugieren la posibilidad de desarrollar un *superhíbrido* de arroz de altísimo potencial de rendimiento, en el que las tres últimas hojas, incluyendo la hoja bandera, sean largas (más de 50 cm.), angostas y en forma de V, tengan un peso específico elevado y sean de color verde oscuro (Yuan, 2001). Lo interesante de esta sugerencia es que las variedades Fedearroz 50, Fedearroz 60 y otras desarrolladas recientemente en Colombia y otros países de América Latina ya poseen esas características.

Caracteres relacionados con la panícula

Tamaño de la panícula
Debería esperarse un rendimiento alto de las líneas que combinan un buen macollamiento con panículas largas. Sin embargo, hay una asociación negativa entre el tamaño de la panícula y el número de panículas por unidad de área, y esta asociación dificulta el desarrollo de genotipos que tengan muchas macollas y panículas excepcionalmente largas. Además, los caracteres de la panícula no determinan, estrictamente hablando, el rendimiento de la planta. No obstante, algunas observaciones de campo recientes sugieren que es posible desarrollar genotipos de arroz de buen macollamiento y de panículas largas que posean una capacidad de rendimiento más alta que otras variedades conocidas.

En realidad, los dos caracteres importantes relacionados con la panícula son el número de *granos llenos* por panícula y el peso de los mismos, pues existen genotipos con panículas largas, pero con pocos granos.

Para producir genotipos cuya capacidad de rendimiento sea alta y esté basada en un número considerable de granos por panícula, es necesario que las plantas posean la habilidad para llenar esos

granos. Por ejemplo, el nuevo tipo de planta del IRRI no respondió a las expectativas de rendimiento que había suscitado porque produce poca biomasa y sus granos no se llenan bien (Peng, 2004). Asimismo, es fundamental que esos genotipos sean de tallos gruesos y fuertes para que soporten el peso de panículas más grandes.

Exerción de la panícula
Las panículas deben emerger completamente de la vaina de la hoja bandera, condición denominada a veces 'exerción' de la panícula (del inglés 'exertion' = proyección). Se acepta que el carácter de panícula completamente emergida es dominante sobre el de panícula parcialmente encerrada, aunque la temperatura del aire y, posiblemente, la sombra que reciba la planta modifican notablemente la expresión del carácter.

En muchas líneas y variedades, las panículas sobresalen completamente si el tiempo atmosférico es cálido después de su iniciación, pero si es un poco frío, la emergencia de las panículas es incompleta.

Duración del tiempo de llenado del grano
Se ha observado, muchas veces, que el tiempo que emplean los granos para desarrollarse completamente (etapa o período de llenado del grano) está asociado con una diferencia en el rendimiento, aunque no se ha comprobado esta relación. Es razonable pensar que rinde más una planta que haya tenido la oportunidad de acumular mayor cantidad de materia seca.

Se ha observado la siguiente variación en el período que va de la floración a la maduración del grano:

- En regiones templadas, fluctúa entre 45 y 60 días.
- En los trópicos es de 30 días, en promedio, porque varía de 25 a 35 días según la variedad de arroz.
- En las variedades del grupo Japónica, este período (llenado del grano) es ligeramente más largo, en general, que en las del grupo Índica.

Peso del grano
El peso del grano de arroz varía, aproximadamente, entre 10 y 50 mg por grano. Este carácter se expresa más comúnmente como el peso de 1000 granos al 14% de humedad. El peso de la cáscara del grano representa, normalmente, de 20% a 21% del peso total del grano.

No es posible, al parecer, mejorar el rendimiento del arroz molinado reduciendo el peso de la cáscara; podría incrementarse, en cambio, si se hace aumentar el peso del grano, ya que las variedades de grano grande acumulan más eficientemente el almidón durante el período en que el grano madura. Las variedades de mayor potencial para este tipo de mejoramiento son las de grano largo (6.61 a 7.50 mm).

Fertilidad de las espiguillas
La fertilidad de las espiguillas es un requisito obvio del rendimiento alto. El porcentaje de granos llenos y fértiles está determinado por dos caracteres: el número de granos fertilizados y la capacidad de la planta para llenarlos. Puesto que la esterilidad normal de las espiguillas está entre el 10% y el 15%, un porcentaje mayor debe preocupar al fitomejorador. Las causas de la *esterilidad* común del arroz son las siguientes:

- Falta de luz durante la fase reproductiva y en una parte de la etapa de llenado del grano.
- Temperaturas extremas durante la fase reproductiva.

- Volcamiento de la planta, enfermedades y plagas.
- Incompatibilidad genética.

Los *híbridos* de una variedad tropical del grupo Índica y de otra del grupo Japónica (o del grupo Javánica) son, por lo regular, parcialmente o totalmente estériles; sin embargo, también hay esterilidad en los híbridos lejanos de Índica x Índica. Aunque la generación F_1 muestra comúnmente, de 20% a 80% de espiguillas fértiles, en algunos casos es completamente estéril. En este caso, la producción de una gran cantidad de plantas F_1 para cosechar suficiente semilla para la F_2 no es una decisión práctica; la alternativa sería procesar estos cruzamientos por el método del cultivo de anteras; de esta forma se evitan las interacciones entre los alelos de incompatibilidad del grano de polen y del óvulo y se obtienen plantas fértiles.

Los fitomejoradores deben adoptar un doble enfoque al seleccionar plantas de arroz respecto a la fertilidad:

- En las generaciones *iniciales* (F_2 a F_5), seleccionar plantas de panículas largas, muy fértiles, de granos pesados que indiquen un buen llenado del grano, y cuya maduración sea uniforme.
- En líneas *avanzadas*, la decisión debe basarse en el comportamiento de la línea a través de las localidades y de los semestres de siembra.

Existen variedades muy sensibles a la luz de baja intensidad que presentan un nivel alto de esterilidad, como Fedearroz 50. Estas variedades no son las adecuadas cuando la siembra se hace durante la época de lluvias.

Maduración y fotoperiodismo

Las condiciones climáticas y agronómicas predominantes determinan el número ideal de días desde la siembra del arroz hasta su cosecha, o sea, el ciclo del cultivo. El germoplasma de arroz varía ampliamente en el tiempo total que requiere hasta su maduración, lo que permite a los fitomejoradores crear variedades adecuadas a las condiciones y prácticas de cultivo de cada localidad. Por ejemplo:

- Las variedades que se siembran en los trópicos son insensibles al fotoperíodo y su tiempo de maduración fluctúa entre 90 y 160 días; en estos cultivares, la variación del ciclo está determinada por la temperatura.
- El ciclo de cultivo más adecuado para el arroz parece estar entre 110 y 135 días, pues las variedades que maduran en este tiempo rinden más, habitualmente, que las que maduran antes o después de él (en la mayoría de las condiciones agronómicas favorables).

La *precocidad* como objetivo de mejoramiento es adecuada para escapar de las causas de estrés ambiental, como la sequía o la temperatura baja durante la fase reproductiva. Además, un período vegetativo corto permite hacer un uso más eficiente del agua de riego. Ahora bien, combinar en una variedad el carácter de precocidad con niveles óptimos de macollamiento, de vigor y de capacidad de rendimiento es todavía un desafío fascinante para los fitomejoradores.

Hay buenas fuentes de maduración muy precoz (90-105 días) para los trópicos entre las variedades del grupo Japónica tropical (África), que son insensibles al fotoperíodo, y entre algunas variedades de arroz del sur de Estados Unidos y del IRRI. Los materiales estadounidenses son mejores que los de tipo Japónica porque, aunque emiten pocas macollas y no son muy vigorosos, se combinan mejor con las variedades tropicales del grupo Índica.

Las variedades modernas tienen, en su mayoría, un tiempo de maduración intermedio entre el tardío y el precoz. La *insensibilidad* al fotoperíodo fue una de las razones principales de que muchas variedades enanas modernas se adaptaran a tanta diversidad de ambientes. Gracias a este carácter, los cultivadores de arroz de la zona tropical pueden sembrar en diversas latitudes, producir dos o tres cosechas al año, y disponer de mayor flexibilidad en la elección de la fecha de siembra. Sin embargo, en una variedad insensible al fotoperíodo, la *temperatura* determina el ciclo de vida de la planta: si la temperatura es alta, la variedad florece más rápido, y si es baja, ocurre lo contrario. Esta característica dificulta la adaptación del germoplasma tropical de arroz a las zonas templadas o a las áreas relativamente altas de los trópicos.

Todas las variedades de arroz importantes en el trópico de América Latina son insensibles, o poco sensibles, a la duración del día.

Pigmentación del grano

Este carácter ha recibido más atención que ningún otro, aunque con muy poca justificación. La pigmentación del grano, en cualquiera de sus posibles combinaciones, no parece estar relacionada con el desarrollo del cultivo, ni con la resistencia a plagas, ni con el rendimiento del grano o cualquier otro carácter importante del crecimiento o de la calidad. El color básico de la cáscara del arroz es pajizo o dorado. El color dorado de la cáscara, que es recesivo respecto al color pajizo, es muy común en las variedades comerciales. En realidad, los patrones de pigmentación y su herencia se han convertido en un pasatiempo para algunos genetistas.

Hay dos casos excepcionales en que la pigmentación del grano importa:

- En el arroz precocido, porque un apículo o una cáscara pigmentados puede manchar el endospermo.
- En los cruzamientos en que el progenitor femenino es la variedad de cáscara dorada, porque la herencia simple del color de la cáscara es aquí útil para verificar la autofertilización de las plantas F_1.

Aristas

Casi todos los fitomejoradores seleccionan granos sin aristas, porque éstas son duras, persistentes e inconvenientes en el desgrane y en la molinería (ver Capítulo 4 de esta obra). La arista apenas contribuye en algo al llenado del grano, no lo protege de los pájaros y, aparentemente, no cumple una función útil. Además, los productores asocian las aristas del grano con el arroz rojo y, por ello, una variedad aristada tendría poca aceptación.

En su mayoría, las variedades de arroz no tienen granos con aristas o sólo unos pocos muestran aristas pequeñas, de modo que este carácter rara vez constituye un problema en el mejoramiento. Si se desechan los individuos completamente aristados en las poblaciones F_2 y F_3, se elimina, casi del todo, la dificultad que se presentaría en los cruces en que, ocasionalmente, un progenitor es completamente aristado.

Desgrane

El desgrane o caída del grano desde la panícula, depende del grado de adherencia de la espiguilla a su pedicelo. Este carácter tiene gran importancia económica y es uno de los principales objetivos del mejoramiento genético. La adherencia de la espiguilla se clasifica como fuerte, intermedia o débil.

Si una variedad se cultiva en un área donde los *vientos* son fuertes, los tallos y las panículas deben resistir sacudidas

cuando el grano esté maduro. Por tanto, la resistencia al desgrane es especialmente importante en las variedades de tallos rígidos que son resistentes al acame, porque estos tallos erectos, a diferencia de los que se vuelcan, no pueden evadir las sacudidas fuertes. Ahora bien, si la resistencia al desgrane es exagerada, dificulta la cosecha y causa pérdidas de grano. Lo deseable es, por tanto, una *resistencia intermedia* al desgrane, que permita hacer una cosecha mecánica con muy pocas pérdidas de grano y una trilla del grano más fácil que la corriente.

Las variedades del grupo Japónica y algunas del grupo Índica son muy resistentes al desgrane; el arroz rojo, en cambio, es muy susceptible. La mayoría de las variedades del grupo Índica tienen una resistencia intermedia entre esos dos extremos.

Los fitomejoradores no disponen de un método efectivo para evaluar la facilidad para el desgrane que tiene una planta. La mejor técnica, aunque está lejos de ser la ideal, es sostener las panículas de una planta flojamente con la mano, apretarlas suavemente con los dedos y calcular luego el número de granos desprendidos.

Latencia de la semilla

La latencia de la semilla de arroz es una reducción o suspensión de la habilidad de germinación del grano viable, que ha sido recientemente cosechado. Ésta es, a la par con el desgrane y la presencia de aristas, una característica primitiva del arroz que favorece la supervivencia de la especie en la naturaleza. De otro lado, la latencia del grano es *deseable* en la actividad agronómica de casi todos los ambientes arroceros, porque evita que el grano germine en la panícula días antes de la cosecha si se presentan lluvias o si la humedad ambiental es alta.

Las variedades del grupo Japónica tienen poca o ninguna latencia del grano. En la mayoría de las del grupo Índica existe esa latencia y en muchas de ellas, especialmente las del Asia tropical, la latencia es fuerte.

En condiciones normales, la latencia es *controlada*, en gran parte, por la lema y la pálea y, en menor grado, por el pericarpio y el embrión. El medio ambiente afecta también fuertemente esta característica.

La latencia del grano tiene una duración que debería precisarse solamente cuando se den recomendaciones a los agricultores sobre una nueva variedad; nunca la determina el fitomejorador para un material segregante porque esta labor seria muy dispendiosa. Cuando se estudie esta característica, es importante probar lotes de semilla de distintas áreas de producción de arroz.

Calidad del grano

Apariencia del endosperma

La apariencia de los granos de arroz 'molinados' es importante para el consumidor y, por consiguiente, para el productor y el molinero. Las variedades que tienen un comportamiento superior en el campo no son fácilmente aceptadas por la industria molinera, si el grano tiene una apariencia deficiente una vez molinado. De ahí que esta característica sea de suma importancia en el mejoramiento.

Las áreas opacas del grano se conocen como 'panza blanca', centro blanco o dorso blanco, según su localización en el endospermo. Para evaluar los materiales que están en proceso de mejoramiento, es más conveniente agrupar las manchas bajo el término panza blanca que bajo tres clasificaciones diferentes. La opacidad del grano no debe confundirse

con una apariencia similar de la superficie del arroz glutinoso o céreo, o con la apariencia de los granos inmaduros (de color de yeso) que se cosechan con un alto contenido de humedad antes de su madurez fisiológica o que deben esa apariencia a la acción de algunas plagas.

El carácter panza blanca y su intensidad tienen un control genético parcial, porque algunos *factores ambientales* influyen notoriamente en su expresión; por ejemplo:

- En una misma panícula, los granos individuales pueden diferir en opacidad.
- En algunas variedades, como Oryzica 1 y Fedearroz 60, la panza blanca del grano se desarrolla poco, aun en ambientes de alta presión (ambiental o biótica).
- En otras variedades, como CICA 4 y CICA 8, el endospermo se presenta claro en algunos ambientes y considerablemente opaco en otros.
- En la variedad IR 8 y en otras similares, el endospermo resulta muy marcado por la panza blanca en casi todos los ambientes de cultivo.

El principal factor ambiental que influye en la opacidad del endospermo parece ser la *temperatura* del medio inmediatamente después de la floración. Por tanto, los materiales que se seleccionen respecto al endospermo claro en áreas de temperatura relativamente fresca, deben examinarse rigurosamente en ambientes más calientes que los anteriores. En realidad, el llenado del grano es un proceso delicado y cualquier estrés que afecte la planta en esa etapa hace presente la panza blanca o centro blanco en el grano.

La selección que se hace respecto al grano translúcido debe contar con condiciones de alta presión (alta temperatura y luz de baja intensidad durante el llenado), pues ellas permiten discriminar los genotipos que tendrán granos translúcidos en la mayoría de las condiciones de cultivo.

Longitud, forma y calidad de molinería del grano

Las normas para evaluar el grano de los materiales de mejoramiento respecto a su longitud y su forma varían entre los países y entre las regiones en que el arroz se mercadea. El Cuadro 1 muestra una clasificación razonable y útil del grano de arroz, que puede usarse en las evaluaciones rutinarias de los proyectos de mejoramiento.

Longitud del grano

En América Latina se prefiere, en general, el grano largo, delgado y translúcido, aunque hay excepciones:

- En Argentina se prefieren las variedades de arroz de grano largo y grueso, conocidas como 'doble Carolina'; por ello, su precio es mayor que el del arroz de grano largo y fino.

Cuadro 1. Clasificación del grano de arroz 'molinado', según su longitud y su forma.

Longitud (denominación)	Medida (mm)	Escala	Forma	Relación largo/ancho	Escala
Extralargo	> 7.50	1	Delgado	> 3.0	1
Largo	6.61 – 7.50	3	Intermedio	2.1 – 3.0	3
Intermedio	5.51 – 6.60	5	Ovalado	1.1 – 2.0	5
Corto	< 5.50	7 – 9	Redondo	< 1.1	7 – 9

- En Brasil tienen aceptación las variedades de arroz de grano corto y bajo nivel de amilosa, por la influencia cultural de los inmigrantes japoneses.
- En México se ha desarrollado un mercado particular que prefiere granos cortos que tengan centro blanco notorio, como los de la variedad IR 8.

La anchura, el grosor y la forma del grano son menos variables y menos importantes que su longitud, aunque los mercados de arroz de alta calidad suelen exigir granos cuya forma esté entre delgada e intermedia (entre 1 y 3 de la escala, ver Cuadro 1). El grano ovalado (5 en la escala) es rechazado con frecuencia porque se parte durante la molinería. Usualmente, aunque no siempre, los granos de longitud corta a intermedia (de menos de 5.5 a 6.6 mm) se parten menos en la molinería que los granos largos. Por consiguiente, el tamaño (longitud y grosor) y la forma del grano están estrechamente relacionados con el 'índice de pilada' o rendimiento de grano entero en la molinería.

Los fitomejoradores deberían hacer más énfasis en mejorar el arroz respecto a la obtención de *granos enteros* en la molinería que respecto al rendimiento total, puesto que, en términos comerciales, es una característica más importante que presenta, además, diferencias genotípicas estables y coherentes y, probablemente, más fáciles de mejorar.

El entrecruzamiento de líneas élite durante varios ciclos y la selección estricta respecto al tipo de grano y al endospermo claro ha producido variedades cuyos granos tienen una apariencia y una calidad excelentes. Un ejemplo reciente es la variedad Fedearroz 60, que posee las siguientes características:

- Grano extralargo (más de 7.5 mm, grado 1).
- Grano casi translucido en todos los ambientes de cultivo.
- Buen rendimiento de grano entero en la molinería.
- Contenido de amilosa intermedio.
- Elongación del grano durante la cocción.

No obstante, el rendimiento de grano entero de las variedades tropicales mejoradas es, en general, menor que el de las variedades de los Estados Unidos.

Las mediciones directas de la *calidad de molinería* comienzan, habitualmente, con el grano de las líneas superiores F_5 ó F_6, que han sido seleccionadas tentativamente para incluirlas en ensayos preliminares de rendimiento. La evaluación que se hace en estos ensayos debe incluir variedades testigo, bien conocidas, que se someten a todas las pruebas estándar de rendimiento y multiplicación. El procedimiento aplicado comúnmente es el siguiente:

- Se secan varias muestras de grano de 1 kg hasta que lleguen a menos de 14% de humedad.
- Las muestras se descascaran y se pulen (molinería) con el equipo de laboratorio, siguiendo cuidadosamente las recomendaciones del fabricante del equipo sobre el tiempo de molinado y sobre el peso aplicado al molino.
- Si la línea da un rendimiento de arroz entero excesivamente bajo, se comprueba dos veces el resultado, y se descartan las variedades confirmadas como no satisfactorias.

La correlación entre los resultados obtenidos con 1 kg de arroz molinado en el laboratorio y con muestras obtenidas en grandes molinos comerciales es generalmente satisfactoria.

Es imprescindible hacer una evaluación, al menos, de la calidad de molinería (lo ideal es hacer más de una) en un molino comercial, antes de liberar una nueva variedad de arroz a los agricultores. Puesto que esta evaluación requiere de 2 a 4 toneladas de arroz, hay que hacerla con el grano producido en la primera etapa de multiplicación de semilla en gran escala. Esta prueba debe repetirse (cuando sea posible hacerlo) después de que el arroz ha estado almacenado de 3 a 4 meses, ya que el almacenamiento aumenta al máximo tanto la dureza del grano como el rendimiento de arroz entero en la molinería.

Efecto del retraso de cosecha

La tolerancia del retraso de cosecha es una característica fundamental de una variedad de arroz que pretenda lograr la aceptación de los agricultores. La variedad susceptible tiende a presentar fisuras en los granos cuando éstos, una vez alcanzada la humedad óptima de cosecha, son rehidratados. Si la cosecha no se hace oportunamente y el grano se humedece nuevamente (por una lluvia inesperada), habrá una disminución considerable de granos enteros y, por ende, del rendimiento.

Los genotipos de arroz difieren notablemente respecto a esta característica. Por ejemplo, las variedades IRGA 409 y Fedearroz 50 son altamente resistentes al retraso de cosecha, mientras que Fundarroz PN1 y Fedearroz 2000 son altamente susceptibles.

En el Fondo Latinoamericano para el Arroz de Riego (FLAR) se ha desarrollado una metodología sencilla para evaluar líneas avanzadas y caracterizar progenitores respecto al carácter en cuestión. Consta de los siguientes pasos:

- Los materiales que se evaluarán se cosechan a la humedad óptima del grano (entre 20% y 24%).
- Ese grano se somete al secado normal, empleando un secador de aire, hasta que tenga de un 12% a un 13% de humedad, esta muestra se divide en dos sub-muestras, cada una de 125 g.
- Con la primera se hace la molinería del grano en el tiempo oportuno.
- Con la segunda se hace la prueba de retraso; para ello se remoja el grano durante 2 horas, y luego se lleva nuevamente a 13% de humedad con aire caliente.
- Se dejan reposar las muestras durante 8 días, y se someten al proceso de molinería.
- Se compara el rendimiento de grano entero entre la muestra molinada a tiempo y la muestra molinada después de ser sometida a remojo.

En un material resistente al retraso de cosecha, la reducción en el rendimiento de grano entero puede estar entre un 0% y un 20%; en un material susceptible; en cambio, la reducción puede llegar a ser mayor que el 50% (Berrío et al., 2002).

Los resultados obtenidos en el programa de mejoramiento del FLAR indican que es fácil mejorar esta característica. Se han producido líneas altamente resistentes en las cuales la reducción es de menos del 5%.

Contenido de amilosa

La amilosa es la fracción lineal del almidón y la amilopectina su fracción ramificada; ambas se encuentran, en distinto porcentaje, en todos los almidones. Las variedades de arroz pueden agruparse, según el contenido de amilosa del endospermo de sus granos, en glutinosas (1% a 2% de amilosa), bajas en amilosa (8% a 20% de amilosa) e

intermedias (21% a 25% de amilosa). Si su almidón contiene más de 25% de amilosa, la variedad se clasifica como alta.

En su mayoría, las variedades de arroz del mundo no son glutinosas; por tanto, el contenido de amilosa de sus granos está en un intervalo amplio de 8% a 37%, aunque fluctúa, generalmente, entre 13% y 32%.

Las condiciones del *medio ambiente* modifican parcialmente el contenido de amilosa del arroz; por ejemplo:

- La temperatura alta durante la maduración del grano hace disminuir el porcentaje de amilosa de éste.
- Entre una época (o semestre) de siembra y otro diferente, el contenido de amilosa de una variedad puede variar hasta en un 6%.

En general se evita emplear en los cruzamientos a progenitores con bajo contenido de amilosa. La selección para el contenido de amilosa se inicia con la semilla F4.

Actualmente, existen marcadores moleculares que permiten realizar la selección por el contenido de amilosa —y por otras características relacionadas con la calidad culinaria del arroz— de forma indirecta y, probablemente, a menor costo (Boyett et al., 2006). Estos marcadores ayudan a evaluar el contenido de amilosa sin la interferencia de efectos ambientales y a identificar individuos heterocigotos.

Calidad de cocción

Las variedades de arroz se clasifican en grupos amplios según su calidad de cocción, y ésta se determina mediante una evaluación complementaria del contenido de amilosa, de la consistencia del gel y de la temperatura de gelatinización. Dentro de cada uno de esos grupos, las variedades de arroz difieren en gustosidad (o 'palatabilidad'), diferencia que siempre detectan los consumidores. Por tal razón, los fitomejoradores deben cocinar y probar el arroz cocido, tanto en caliente como en frío, proveniente del grano de los materiales promisorios, antes de que éstos sean distribuidos como variedades.

El arroz en cáscara debe almacenarse, por lo menos, 4 meses después de la cosecha, y entonces se lleva a cabo la prueba de degustación. El tiempo de almacenamiento hace que los granos de arroz absorban más agua y se expandan más durante la cocción; este arroz cocido es más suelto y esponjoso que si se cocinara recién cosechado.

Los consumidores de América Latina prefieren las variedades de arroz intermedias, tanto en contenido de amilosa (21% a 25%) como en temperatura de gelatinización. Hay cultivares de arroz que tienen un contenido similar de amilosa pero diferentes características de cocción. Estos cultivares pueden distinguirse mediante análisis muy refinados que son difíciles de practicar para la mayoría de los programas de mejoramiento; la prueba de cocción sería, por tanto, la más adecuada.

Contenido de proteína

El contenido de proteína del grano de arroz, aunque sujeto a variaciones debidas a la variedad de arroz y al ambiente en que ésta se cultive, es de 7%, aproximadamente, en el arroz blanco ('molinado') y de 8% en el arroz integral. La distribución proporcional de los aminoácidos que contiene la proteína del arroz es excepcionalmente buena: el contenido de lisina, por ejemplo, está entre el 3.8% y el 4.0% del total de proteína.

Mayor resistencia a las plagas

Incorporar en las plantas una resistencia estable a las principales plagas es una tarea desafiante. El término plaga comprende los microorganismos patógenos (hongos, bacterias y virus), que causan enfermedades, y los insectos dañinos, que causan daños a la planta. La dificultad de este trabajo supera la de cualquier contribución antes descrita al mejoramiento del arroz.

Importancia en los trópicos

Mejorar en las plantas su resistencia a las plagas es un objetivo importante en la zona intertropical (los trópicos), por las siguientes razones:

- El arroz se cultiva ampliamente en los *trópicos* húmedos y cálidos, donde las plagas son más numerosas que en las zonas templadas; en éstas, los patógenos hibernan y los insectos entran en diapausa en la estación invernal.
- Unas *pocas variedades* mejoradas de arroz han sido adoptadas en muchos sitios, lo que crea condiciones muy favorables para algunas plagas; por ejemplo, la aplicación de altas dosis de N y los espaciamientos cortos (dos requisitos de esas variedades) y la siembra continua han aumentado la severidad de enfermedades como piricularia, añublo bacteriano y añublo de la vaina, y el ataque de los insectos chupadores.
- Los productos *agroquímicos* aumentan continuamente de precio y el público es cada vez más conciente de sus efectos nocivos para el medio ambiente. Para sustituirlos —reduciendo así la contaminación, los costos de producción y las pérdidas de campo— y ganar además la confianza del público, la alternativa es mejorar la resistencia de las plantas a la acción de las plagas que hospedan.
- Unas cuantas variedades nuevas se han diseminado en millones de hectáreas, amenazando con sofocar genéticamente a cientos de variedades locales. La uniformidad genética creciente empieza a destruir la *diversidad genética*, que es una importante barrera natural contra la dispersión de las plagas (en especial, las de carácter epidémico). Aunque el número de nuevas variedades crece constantemente y continuará en ascenso, esta cantidad de variabilidad genética jamás se aproximará al nivel que tenía en un principio.

Afortunadamente, la amplia *variabilidad genética* del arroz permite que el trabajo de mejoramiento incorpore en las plantas una resistencia útil a la mayoría de las plagas importantes. Sin embargo, la explotación apropiada de esa resistencia apenas ha comenzado.

Resistencia estable

El principal objetivo de todo programa de mejoramiento de arroz, que busque resistencia a las plagas, es identificar y utilizar efectivamente una resistencia estable a las principales plagas. Una fuente amplia de tal resistencia estable debería mantener, durante un tiempo largo, un nivel satisfactorio de resistencia contra las razas o biotipos diversos de las plagas en muchas regiones.

A las enfermedades

Respecto a las plagas debidas a los microorganismos (las enfermedades), hay dos tipos de resistencia, y las plantas desarrollan uno u otro, generalmente, pero a veces los dos:

- Resistencia *vertical* o específica, en que la planta restringe el proceso de infección y hay interacción gen a gen.

- Resistencia *horizontal* o no específica, en que la planta restringe la colonización del organismo parásito, es decir, su crecimiento y su dispersión.

La resistencia específica dura poco tiempo, generalmente, mientras que la resistencia no específica es más duradera. El número de genes que controlan directamente la resistencia condiciona la facilidad y la efectividad con que puede aprovecharse esa resistencia, como se indica enseguida:

- La resistencia *específica*, que es controlada, en general, por uno o dos genes, es relativamente *fácil* de aprovechar porque la reacción de las plantas en las poblaciones segregantes es discreta y fácilmente identificable.
- La resistencia *no específica*, que es controlada por varios genes, y es mucho más *difícil* de evaluar y manipular, por dos razones: no se expresa a un nivel confiable en las pruebas hechas a las plántulas, y requiere técnicas especiales para evaluar las plantas adultas directamente en el campo.

Los resultados obtenidos por el programa de arroz del CIAT respecto a la enfermedad piricularia indican que es posible lograr resistencia durable *combinando* ambos tipos de resistencia (específica y no específica) y haciendo selección en un ambiente muy favorable a la presencia de la enfermedad, en el que haya una gran diversidad genética del organismo patógeno (hongo o bacteria).

La resistencia vertical es duradera (en el arroz y en otros cultivos) contra organismos patógenos que tengan poca variabilidad genética, pero es inestable contra los que son genéticamente variables. Una vez más, la estrategia más adecuada es combinar ambos tipos de resistencia (vertical y horizontal) contra tales patógenos, por dos razones: primera, es menor la probabilidad de perder la resistencia; y segunda, los genes menores atenúan el impacto de la pérdida de resistencia de los genes mayores.

Casi toda la resistencia identificada y utilizada hasta ahora contra las principales enfermedades del arroz ha sido *vertical*. Esta resistencia es de larga duración para el virus hoja blanca, el virus tungro y el del enanismo; de duración intermedia para el añublo bacteriano; y de corta duración para la piricularia.

Donde el escaldado de la hoja, el añublo de la vaina y la helmintosporiosis son enfermedades de tipo endémico, los fitomejoradores han seleccionado las plantas menos afectadas. Las diferencias que han observado en la reacción de las plantas a las enfermedades dichas obedecen, probablemente, a una resistencia *horizontal*.

A los insectos dañinos

La resistencia de las plantas de arroz al ataque de los insectos dañinos puede clasificarse en tres categorías amplias:

- No preferencia, en que la planta desarrolla ciertos elementos que la hacen poco atractiva para la oviposición o la alimentación de los insectos.
- Por antibiosis, en que la planta afecta negativamente el desarrollo y la multiplicación de los insectos que pretenden colonizarla.
- Por tolerancia, en que la planta soporta una población grande de insectos sin sufrir un daño serio.

Las dos clases más efectivas de resistencia son las que actúan 'por no preferencia' y 'por antibiosis', porque controlan la mayoría de los insectos dañinos y lo hacen reduciendo su población. La resistencia por tolerancia, en cambio, no inhibe la multiplicación del insecto y, en ocasiones, contribuye a que éste se multiplique más.

La resistencia debida a herencia simple (pocos genes) ha sido duradera en el control del saltahojas verde (*Tagosodes oryzicolus*), pero de muy corta duración en el del saltahojas café (*Nilaparvata lugens*). La resistencia de tipo multigénico (varios genes) ha tenido efecto en los insectos barrenadores; sin embargo, no ha sido fácil evaluarla porque los niveles de resistencia observados han sido generalmente bajos, y porque la población de barrenadores de las principales especies evaluadas ha sido relativamente pequeña.

Tolerancia de condiciones edáficas desfavorables

La tolerancia genética de las variedades de arroz respecto a las condiciones edáficas adversas varía enormemente. Durante siglos, las variedades de arroz han evolucionado frente a condiciones del suelo como la salinidad, la alcalinidad, la toxicidad del Fe, la acidez fuerte, los niveles tóxicos de Al y la deficiencia de Zn y de P, o han sido seleccionadas respecto a esas condiciones. No obstante, la mayoría de esas variedades tolerantes rinde muy poco y carecen de resistencia a las principales plagas del arroz (patógenos e insectos dañinos).

Se han desarrollado *procedimientos* para seleccionar las variedades que toleran la mayoría de los problemas edáficos. Ahora bien, la interacción entre la planta de arroz y muchos factores del suelo es tan compleja, que esos procedimientos se depuran y se mejoran continuamente; además, cada día se caracterizan mejor los tipos de suelo que tienen dichos problemas.

De la salinidad y la alcalinidad

El problema edáfico más común en los suelos agrícolas lo presentan la salinidad y la alcalinidad. En más de 50 millones de hectáreas de tierras áridas o de planicies costeras del sur y del sureste de Asia y de varias regiones tropicales y subtropicales de África y América del Sur, el contenido de sales del suelo llega a un *nivel tóxico* que impide o limita el cultivo del arroz.

Una *medida* de la salinidad del suelo es su conductividad eléctrica (o capacidad para conducir la corriente eléctrica). Cuando esa conductividad pasa de 4 dS/m, las sales que la permiten afectan las plantas de arroz; si pasa de 10 dS/m, esas sales afectan drásticamente su crecimiento (Mackill et al., 1996).

El grado de estrés que sufren las plantas por el exceso de sales varía según las *condiciones* siguientes:

- Al cambiar de una época estacional a otra, y aun al pasar de un sitio a otro en un mismo campo, lo que dificulta la evaluación uniforme de las plantas en condiciones naturales.
- Al pasar el arroz del estado de plántula, en el que es muy susceptible a la salinidad, a plantas de más edad, que ya se tornan tolerantes.
- En algunos genotipos, que son tolerantes de la salinidad durante la fase vegetativa, pero son susceptibles a ella en la fase reproductiva.

Esto último sugiere que la evaluación de las plantas debe hacerse en todas sus etapas de desarrollo. La diferencia entre

una línea de arroz susceptible a la salinidad y otra tolerante de esta condición del suelo se aprecia claramente en un suelo cuya concentración de sales tenga una conductividad específica de 8 a 10 mmho/cm a 25 °C[2]. Para seleccionar bien las plantas respecto a su respuesta a la salinidad del suelo, la temperatura ambiente debe ir de moderada a cálida.

De la toxicidad del hierro

Un exceso de Fe en el suelo (o en la planta) causa toxicidad en el arroz. Este desorden nutricional es muy frecuente en los Ultisoles y en los Oxisoles muy ácidos, y en los suelos que contengan sulfatos ácidos (también denominados bisulfatos: el ión HSO_4^- unido a cationes metálicos, generalmente). Aunque la planta de arroz exhiba un desarrollo vegetativo aceptable, el daño causado por esta toxicidad va desde un bajo rendimiento de grano hasta la muerte de la planta. Los siguientes factores agravan la toxicidad: el tipo de suelo, el manejo del agua, la variedad, la edad del cultivo, el estado nutricional general de la planta y las condiciones meteorológicas.

Generalmente, los fitomejoradores seleccionan líneas de arroz por su tolerancia de la toxicidad del hierro en áreas donde esta condición edáfica se presenta naturalmente. Además, es difícil mantener un nivel adecuado de hierro en los suelos acondicionados de un invernadero o del campo. Los investigadores agrícolas del Estado de Santa Catarina, en Brasil, desarrollaron una metodología para evaluar las plantas en el campo, la cual ha permitido hacer avances significativos en el mejoramiento del arroz respecto al carácter de tolerancia del Fe en las plantas (Bacha y Takazi, 1986).

De la deficiencia de zinc

Esta deficiencia crea un problema nutricional en las plantas de arroz, que limita el rendimiento del cultivo en las regiones húmedas. Más importante aún es el hecho de que esta deficiencia puede volverse cada vez más aguda por causa de las *prácticas agronómicas* siguientes:

- El cultivo de variedades mejoradas de alto rendimiento, porque absorben una mayor cantidad de Zn del suelo que las variedades tradicionales.
- La sustitución del sulfato de amonio (un fertilizante ácido) por la urea.
- El uso continuo de fertilizantes fosfóricos.
- El cultivo continúo de arroz durante dos o tres períodos (y la recolección de las cosechas consecutivas) en lotes preparados por el método del 'fangueo'.

Se puede inferir de ahí que las variedades que tengan alguna tolerancia de la deficiencia de Zn habrán reducido la cantidad requerida de este elemento en su metabolismo.

Referencias bibliográficas

Agrama, N.; Eizenaga, G.; Yan, W. 2007. Association mapping of yield and yield components in rice cultivars. Molecular Breeding 19:341-356.

2. N. del E.: 1 mmho/cm = 1dS/m (1 mho = 1 S, S = Siemen; mho (unidad de conductividad) es el inverso de ohm (unidad de resistencia). (Ver Wikipedia.)

Alberbide, M.; Yu, J.; Bernardo, R. 2006. Power of mixed models QTL's mapping from phenotypic, pedigree and marker data in self pollinated crops. Theoretical and Applied Genetics 112:876-884.

Bacha, R.E.; Takazi, I. 1986. Toxicidad por hierro en arroz: Metodología para seleccionar genotipos resistentes en Brasil. Arroz en las Américas (CIAT) 7(1):1-4.

Bermang, C.; Delgado, J.; McClung, A.; Fjellstrom. 2001. An improved method for using a microsatellite in the rice gene to determine amilose classes. Cereal Chemistry 78(3): 257-260.

Bernardo, R. 2008. Molecular markers and selection for complex traits in plants: Learning from the last 20 years. Crop Science 48: 1649-1664.

Berrío O., L.E.; Jennings, P.; Torres, E.A. 2002. Breeding rice in Colombia for tolerance to delayed harvest. In: Proceedings of the Twenty-Ninth Session Rice Technical Working Group (RTWG). February 24-27, 2002. Little Rock, AR, EE.UU.

Boyett, V.A.; Gibbons J.W.; Moldenhauer, K. 2005. Marker-assisted selection accelerates screening for agronomic traits. In: Norman, R.; Meullenet, J.F.; Moldenhauer, K. (eds.). B.R. Wells rice research series 2005. No. 540. Arkansas Agricultural Experimental Station. p. 48-52. Disponible también en: http://arkansasagnews.uark.edu/893.htm

Boyett, V.A.; Gibbons, J.W.; Bryant, R.J.; Eizenaga, G.C.; Moldenhauer, K. 2006. Utilization of trait-linked DNA markers in rice breeding. In: Norman, R.J.; Meullenet, J.F.; Moldenhauer K. (eds.). B.R. Wells rice research series 2006. Arkansas Agricultural Experimental Station. No. 550. p. 43-50. Disponible también en: http://arkansasagnews.uark.edu/408.htm

Boyett, V.A.; Gibbons, J.W.; Moldenhauer, K. 2007. Increasing the efficiency of a marker assisted breeding program. In: Norman, R.J.; Meullenet, J.F.; Moldenhauer K. (eds.). B.R. Wells rice research studies 2007. No. 560. Arkansas Agricultural Experimental Station. p. 38-43. Disponible también en: http://arkansasagnews.uark.edu/2508.htm

Chao, H. 1993. Historical review of semi-dwarf rices and breeding of new-plant type for sustainable agriculture.

Chen, S.H.; Bergman, C.; Fjelstrom, R. 2007. Rice waxy genes SNP's: Associations with amylose content and structure and pasting properties. In: Memorias de la Reunión de la American Association of Cereal Chemists celebrada del 7 al 10 de octubre de 2007 en San Antonio, Texas. San Antonio, TX, EE.UU. p. 52. [Resumen]

CIAT (Centro Internacional de Agricultura Tropical). 1979. Programa de Arroz. In: Informe Anual 1978. Cali, Colombia. p. 3-18.

CIAT (Centro Internacional de Agricultura Tropical). 1981. Programa de Arroz. In: Informe Anual CIAT 1980. Cali, Colombia. p. 3-39.

CIAT (Centro Internacional de Agricultura Tropical). 1982. Programa de Arroz. In: Informe Anual CIAT 1981. Cali, Colombia. p. 3-24.

CIAT (Centro Internacional de Agricultura Tropical). 1987. Programa de Arroz. In: Informe Anual 1987. Cali, Colombia. p. 4-22.

CIAT (Centro Internacional de Agricultura Tropical). 2006. Output 2: Characterizing rice pests and genetics of resistance. In: CIAT Rice Program 2006. Cali, Colombia. p. 21-34.

Croughan, T.P. 2003. Clearfield rice: It's not a GMO. Louisiana Agriculture 46(4):24-26.

Holguín, J.; Corredor, E.; Gutiérrez, P. 1998. Desarrollo del arroz híbrido en Colombia. Revista Arroz (Colombia) 47(416):22-27.

Jennings, P.R.; Coffman, W.R.; Kauffman, H.E. 1979. Rice improvement. International Rice Research Institute (IRRI), Los Baños, Filipinas. 186 p.

Jennings, P.R.; Coffman, W.R.; Kauffman, H.E. 1985. El mejoramiento del arroz. In: Tascón, E.; García, E. (eds.). Arroz: Investigación y producción. Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT) y Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD), Cali, Colombia. p. 205-231.

Lentini, Z.; Martínez, C.P.; Roca, W. 1997. Cultivo de anteras de arroz en el desarrollo de germoplasma. Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), Cali, Colombia. 57 p.

Livore, A. 2006. New source of imidazolinones resistance in rice. In: Memorias de una reunión del Thirty-First Rice Technical Working Group celebrada en The Woodland Texas, del 26 de febrero al 1 de marzo de 2006. The Woodland, TX, EE.UU. p. 48.

Mackill, D.; Coffman W.; Garrity, D. 1996. Rainfed lowland rice improvement. International Rice Research Institute (IRRI), Los Baños, Filipinas. 242 p.

Malosetti, M. 2006. Mixed model methodology for the identification of genetic factors underlying trait variation in plants. (Tesis, Ph.D.). Universidad de Wageningen, Holanda. 128 p.

Martínez, C.P. 1985. Diferentes alternativas empleadas en la obtención de variedades de arroz resistentes a *Pyricularia oryzae* Cav. In: Tascón, E.; García, E. (eds.). Arroz: Investigación y producción. Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT) y Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD), Cali, Colombia. p. 257-275.

Martínez, C.P.; Lentini, Z.; Châtel, M.; González, D.; Mojica, D. 1997. Uso de selección recurrente en combinación con cultivo de anteras en el programa de arroz de riego del CIAT. In: Guimarães, E.P. (ed.). Selección recurrente en arroz. Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), Cali, Colombia. p. 139-149.

Martínez, C.P.; Borrero, J.; Almeida, A; Duque, M.; Correa-Victoria, F.; Tohme, J. 2006. Utilization of wild rice species to broaden the genetic base of cultivated rice in Latin América. Memorias de una reunion del Thirty-First Rice Technical Working Group celebrada en The Woodland, Texas, del 26 de febrero al 1 de marzo de 2006. The Woodland, TX, EE.UU. p. 43.

Muñoz, D. 1994. Híbridos de arroz en Colombia. Arroz en las Américas (CIAT) 15(1):5-6.

Neves, P.; Rangel, P. 1994. Brasil desarrolla variedades híbridas de arroz. Arroz en las Américas (CIAT) 15(1):2.

Parisseaux, B.; Bernardo, R. 2004. In silico mapping of quantitative trait loci in maize. Theoretical and Applied Genetics 109(3):508-514.

Peng, S.; Cassman, K.; Virmani, S.; Khush, G. 2004. Yield potential trends of tropical rice since the release of IR 8 and the challenge of increasing rice yield potential. Crop Science 39:1552-1559.

Rosso, A.F. de; Lopes, S.I.G.; Lopes, M.C.B.; Cruz, R.P. da; Carmona, P.S.; Wang, L.; Scherer, R. 2006. Programa de melhoramento de arroz híbrido da parceria IRGA/Fazenda Ana Paula. Trabajo presentado en el 5o. CBAI, Pelotas, RS, Brasil.

Virmani, S. 2005. Heterosis in rice for increasing rice yield, production efficiency and rural employment opportunities. In: Rice is life: Perspectives for the 21st century. Memorias de la World Rice Research Conference celebrada en Tsukuba, Japón, del 4 al 7 de noviembre de 2004. p. 162-166.

Virmani, S.; Kumar, I. 2004. Development and use of hybrid rice technology to increase rice productivity in the tropics. International Rice Research Newsletter 24(1):10-19.

Xu, Y.; McCouch, S.; Zhang, Q. 2005. How we can use genomics to improve cereals with rice as reference genome. Plant Molecular Biology 59:7-26.

Yoshida, S. 1981. Fundamentals of rice crop science. International Rice Research Institute (IRRI), Los Baños, Filipinas. 269 p.

Yuan, L.P. 2001. Breeding for a super hybrid rice. In: Peng, S.; Hardy, B. (eds.). Rice research for food security and poverty alleviation. International Rice Research Institute (IRRI), Los Baños, Filipinas. p. 143-149.

Zhou, M.; Xu, H.; Wei, X.; Ye, Z.; Wei, L.; Gong, W.; Wang, Y.; Zhu, Z. 2006. Identification of a glyphosate-resistant mutant of rice (5-enolpyruvil-shikimate 3-phosphate synthase) using a directed evolution strategy. Plant Physiology 140: 184-195.

Zhu, C.; Gore, M.; Buckler, E.; Yu, Y. 2008. Status and prospects of association mapping in plants. The Plant Genome 1(1):5-20.

Capítulo 10

Tolerancia del arroz a la temperatura baja

Maribel Cruz

Contenido

	Página
Resumen	180
Abstract	181
Introducción	181
Revisión de la literatura	181
Daño causado por el frío al cultivo del arroz	183
Sintomatología del daño	183
Mejoramiento por tolerancia del frío	184
Primeras investigaciones	184
Programa del FLAR	184
Evaluación en condiciones controladas	185
Resultados del programa de mejoramiento	187
Referencias bibliográficas	188

Resumen

Se revisan los daños causados por las temperaturas bajas y el frío al cultivo del arroz, la sintomatología del daño y las investigaciones en mejoramiento genético con respecto a la tolerancia del frío. Las temperaturas bajas limitan la producción de arroz en las tierras altas de los trópicos y en las franjas subtropicales de las zonas templadas. Por los daños que causa el frío en varias etapas del desarrollo de las plantas, reducen el rendimiento del cultivo, alargan su ciclo vegetativo y deterioran la calidad del grano. La naturaleza de estos daños y su alcance en el tiempo dependen, entre otros factores, de la duración del período frío, de la intensidad del frío y de la etapa en que se halla el cultivo. Una forma de manejar esta adversidad climática es la tolerancia varietal de este tipo de estrés. Los programas de mejoramiento en el Cono Sur de América Latina hacen selección por tolerancia del frío en diferentes estados fenológicos. Generalmente, lo hacen por exposición del germoplasma a condiciones naturales, una metodología que funciona pero es costosa y lenta. Recientemente, el FLAR (Fondo Latinoamericano para Arroz de Riego) desarrolló algunos procedimientos en condiciones controladas para acelerar la selección de germoplasma, en los que combinó la tolerancia del frío del arroz tipo Japónica con el potencial de rendimiento y la calidad del arroz tipo Índica. Este objetivo ha sido perseguido constantemente por diversas organizaciones de investigación agrícola en las áreas afectadas. Por eso, el FLAR, desde el 2001, trabaja en

un programa cuyo objetivo principal es combinar el alto rendimiento con la tolerancia del frío para ofrecer germoplasma útil a los socios ubicados en la zona templada de América del Sur donde el frío es una permanente amenaza del cultivo de arroz.

Abstract

Tolerance of rice to low temperatures

The damages caused to rice crops by low temperatures and cold are reviewed, and crop symptoms are indicated. The results of genetic improvement efforts regarding cold tolerance in rice are also discussed. Low temperatures limit rice production in the tropical and subtropical upland areas of temperate zones. The effects of cold temperatures during different stages of plant development include reduced yields, extended vegetative cycle, and deteriorated grain quality. The nature and extent of the damages caused to the crop will depend, among other factors, on the duration and intensity of the cold spell as well as on the stage of the crop when low temperatures occur. One way to deal with adverse climatic conditions is by using varieties tolerant to this type of stress. Rice improvement programs in the southernmost part of Latin America are selecting germplasm for tolerance to cold conditions at different phenological stages. This is usually done by exposing the germplasm to natural conditions—a methodology that works but is both expensive and time-consuming. The Latin American Fund for Irrigated Rice (FLAR) has recently developed several procedures under controlled conditions to accelerate germplasm selection. This strategy combines the cold tolerance of *japonica* rice with the yield potential and grain quality of *indica* rice. This objective has been persistently pursued by different agricultural research organizations in the affected areas. As a result, since 2001 one of FLAR's programs has focused on combining high yields with cold tolerance to offer useful rice germplasm to its partners in temperate areas of South America, where the cold climate represents an ongoing threat to this crop.

Introducción

La temperatura baja afecta el desarrollo del cultivo del arroz. Los daños que causa el frío al cultivo varían según la edad de las plantas y según su estado fisiológico. Dependen, además, de la duración y la intensidad del frío. Los síntomas del daño debido al frío difieren según la etapa del cultivo. Al inicio puede observarse una mala germinación; en el estado de plántula hay decoloración de las hojas, que se tornan rojizas; en el período vegetativo se reduce el crecimiento o disminuye la producción de macollas (o se observan ambos síntomas); en el período reproductivo hay esterilidad en los granos, que es el daño más grave. Ahora bien, todos estos daños afectan negativamente el rendimiento.

La búsqueda de genotipos tolerantes del frío, de buen rendimiento y de buena calidad de grano, ha sido el objetivo principal del programa de mejoramiento del FLAR para la franja subtropical de la zona templada de América Latina. En esta área predomina el germoplasma de arroz de tipo Índica, que tiene poca tolerancia de las temperaturas bajas o simplemente no las tolera.

Revisión de la literatura

El arroz se siembra en una gran diversidad de pisos climáticos. Originalmente crecía en la zona

intertropical de Asia (Satake, 1976) y actualmente se siembra en todos los continentes, excepto en la Antártida (Mackill y Lei, 1997). Las *temperaturas críticas* (por exceso o por defecto) para el desarrollo del cultivo están fuera del rango comprendido entre 20 y 30 °C, y varían según la variedad de arroz, el tiempo de duración de dicha temperatura, la fluctuación diurna y nocturna de la temperatura, y el estado fisiológico de las plantas (Vargas, 1985).

La temperatura baja es uno de los factores abióticos más importantes del cultivo del arroz en la zona subtropical[1]. Se calcula que, en el mundo, el área sembrada con arroz y sujeta a los daños del frío llega a 7 millones de hectáreas al año, en las que se han presentado las pérdidas siguientes:

- En 1993, en Hokkaido (Japón), el frío cobró 1000 millones de dólares en 135.000 ha (Kariya, 2003).
- En Australia, la reducción del rendimiento debida a las bajas temperaturas se calculó, en promedio, en 0.68 t/ha al año (Farrell et al., 2001).
- En el Cono Sur de América Latina, cerca de 1 millón de hectáreas pueden resultar afectadas por el frío (Cruz et al., 2001).

Las temperaturas bajas y los bajos niveles de radiación solar limitan de modo importante la producción de arroz en Uruguay y son, además, una de las principales causas de la inestabilidad del rendimiento. La *fecha de siembra* puede allí modificarse para que las etapas más sensibles del cultivo coincidan con los días en que es menor la probabilidad de que ocurra un tiempo frío y en que es mayor la cantidad de radiación solar disponible para el cultivo (Deambrosi et al., 1997).

Si se siembra arroz en la época adecuada, se evitaría el frío durante las etapas de embuchamiento y de floración (Toriyama, 1962). Si se atrasa la siembra para escapar del frío al inicio del cultivo, aumenta la probabilidad de encontrar frío y menor radiación solar durante la fase reproductiva. Por su parte, la siembra temprana aumenta la probabilidad de encontrar temperaturas bajas durante la fase de establecimiento del cultivo (FLAR, 2000). Una variedad tolerante del frío en la etapa de germinación tendría una emergencia de plántulas uniforme y un buen establecimiento del cultivo, cuando sea necesario hacer una siembra temprana (Cruz, 2003). Según Farrell et al. (2003), las variedades tolerantes del frío se deben sembrar en el tiempo adecuado, para asegurarse de que la fase reproductiva ocurra cuando las temperaturas nocturnas sean las más altas.

En algunos sitios del Cono Sur de América el Sur, los agricultores hacen *siembras tardías* porque carecen de variedades que toleren el frío en la etapa de germinación y porque ciertas condiciones ambientales no les son favorables al principio, como las lluvias que dificultan la preparación del suelo. Por consiguiente, cuando esos cultivos llegan a la fase reproductiva, no hay coincidencia entre la etapa de floración y el período de máxima luminosidad del lugar. Además, la siembra tardía aumenta la probabilidad de que el frío afecte el cultivo en la fase reproductiva, lo cual contribuye a reducir su capacidad de rendimiento (Cruz, 2004).

1. Se considera temperatura baja la que alcanza a producir daños a la planta, pero sin congelarla (Salahuddin y Vergara, 1974).

En Uruguay se evaluaron, sembradas en dos fechas (28/10/99 y 15/12/99)[2], las variedades comerciales IRGA 417, El Paso 144 e INIA Tacuarí, y las líneas experimentales L2825-CA y L2818-CA. Hubo una pérdida de rendimiento de 7.8, 5.5 y 1.3 t/ha para las tres variedades, respectivamente, comparando los resultados de ambas fechas. Los investigadores destacaron la estabilidad en el rendimiento de las dos líneas experimentales, cuya diferencia de rendimiento fue de 74 y 55 kg/ha, respectivamente, entre una fecha de siembra y otra (Blanco et al., 2000).

Daño causado por el frío al cultivo del arroz

Los daños que causa la temperatura baja al arroz varían según el estado fisiológico del cultivo (Shibata et al., 1970). Los principales son la esterilidad, el retraso en el crecimiento, y el manchado del grano (al que contribuye además un complejo de patógenos); todos afectan el rendimiento.

En los cultivos de arroz en Hokkaido, Japón, la *esterilidad* es el daño agronómico más severo inducido por el frío. El período que va desde la formación del polen hasta la fertilización de los óvulos es muy sensible a la temperatura baja, particularmente en el estado de microsporo joven (Okuno, 2003).

La temperatura *crítica baja* causa la esterilidad de la panícula cuando está en el rango de 15 a 20 °C (Satake, 1976). Nishiyama et al. (1969) observaron que está entre 15 y 17 °C para los genotipos tolerantes y entre 17 y 19 °C para los susceptibles.

2. La segunda fecha no es recomendable para una siembra comercial.

Se han observado varios efectos específicos del frío (Alvarado, 1999):

- Si la temperatura es inferior a 20 °C durante 5 días después de la siembra, la población de plantas de arroz disminuye.
- Si la temperatura está cerca de 16 °C, el período que va de la siembra a la floración se prolonga hasta 120 días (a veces más).
- Cuando la temperatura es menor que 20 °C durante la floración, el porcentaje de esterilidad, que normalmente fluctúa entre 10% y 12%, puede aumentar hasta 60% en esa etapa.

La amplitud térmica grande entre el día y la noche o el frío continuo afecta el cultivo de arroz más que una caída brusca de temperatura. Temperaturas entre 10 y 18 °C limitan considerablemente la producción de arroz (Terres, 1991).

Se espera un rendimiento bajo del cultivo cuando la sumatoria de las temperaturas medias acumuladas por el cultivo es menor que 2700 °C; el rendimiento será intermedio si esa sumatoria está entre 2700 y 2850 °C, y será alto cuando sea mayor que 2850 °C (Alvarado y Grau, 1991).

Sintomatología del daño

No se puede diagnosticar en forma inmediata e inequívoca el daño debido al frío porque no hay un cambio único y característico en las plantas (McKersie, 1996). Además, la mayoría de estos síntomas requieren de tiempo para expresarse. Algunos de los síntomas más claros son los siguientes:

- Estancamiento del crecimiento (o crecimiento lento) de las plántulas.
- Decoloración de las hojas.

- Macollamiento reducido.
- Retraso en la floración.
- 'Exerción' deficiente de la panícula, que es más atacada por enfermedades.
- Degeneración de la punta de las panículas.
- Esterilidad de las espiguillas o espículas.
- Maduración irregular y senescencia tardía (Handani, 1979).
- Llenado deficiente de los granos (Anand et al., 1999).

Mejoramiento por tolerancia del frío

Aunque en el trópico y en el subtrópico de América del Sur el germoplasma tropical de arroz ha causado un impacto positivo en la producción arrocera, este germoplasma tiene aún una seria limitante de la expresión máxima de su potencial de rendimiento: su susceptibilidad a las temperaturas bajas.

Primeras investigaciones

Se han realizado bastantes estudios sobre esta característica y hay varias instituciones agrícolas interesadas en investigarla:

- A fines de los 90 se hizo en Colombia un estudio clave sobre la tolerancia del arroz a la temperatura baja (Mejía, 1988).
- Con apoyo del FLAR se hicieron estudios en Brasil sobre la genética de esa característica (Cruz, 2001), y sobre la metodología de evaluación de la tolerancia del frío, en Colombia (Cruz, 2004).
- El IRRI, el FLAR, el INIA de Uruguay, el INIA de Chile, JICA-Japón, NARCH-Hokkaido, el IRGA, Embrapa, el Instituto Genómico de Beijing y la Universidad de California, son algunas de las instituciones que investigan esta respuesta del arroz al frío.

Programa del FLAR

El Fondo Latinoamericano para Arroz de Riego (FLAR) inició, en el 2001, un programa de mejoramiento del arroz respecto al carácter de tolerancia del frío.

- **Objetivo.** Obtención de genotipos que combinen el alto potencial de rendimiento y la buena calidad del grano del grupo Índica con la tolerancia del frío del grupo Japónica.
- **Inicio.** Las etapas iniciales de este programa de mejoramiento se cumplen en la estación CIAT-Palmira, en Colombia, donde se cuenta con la infraestructura y capacidad suficientes para generar gran cantidad de cruzamientos.
- **Selecciones.** En cada generación se seleccionan (en condiciones controladas) las plantas tolerantes del frío, y en el campo se seleccionan éstas según otras características de interés. La generación F_3 se entrega a los socios del Cono Sur, y ellos se encargan de llevar los materiales recibidos hasta su etapa final (FLAR, 2004).

Flujo de trabajo y manejo de poblaciones

Los primeros cruzamientos tenían como fuente de tolerancia el germoplasma de tipo Japónica (Quillas). En los cruzamientos del siguiente ciclo se utilizó germoplasma producido dentro del programa por medio de cultivo de anteras. En la actualidad se usan como progenitores donantes de tolerancia del frío aquellos que, obtenidos por mejoramiento tradicional, tengan características agronómicas que superen las que poseen las Quillas.

Generación F_1: Se siembra sin someterla a evaluación por su reacción al frío. Se selecciona respecto a las siguientes características: ciclo intermedio a corto, altura de planta intermedia a baja, muy poca esterilidad en los granos, grano de largo a extralargo, sanidad de la planta, grosor de los tallos y tipo de planta semiabierto.

Generación F_2: Se evalúa esta generación por su tolerancia del frío en estado de plántula (50 plantas por familia), y las plantas tolerantes se trasplantan al campo. En éstas se hace selección respecto a los caracteres considerados en la anterior generación, y se tienen en cuenta, además, la tolerancia de la panícula al desgrane, la ausencia de aristas en el grano y el carácter glabro de la planta.

Generación F_3: Esta generación se divide en tres grupos, cada uno con el siguiente objetivo:

- *Grupo 1:* para evaluación respecto al frío (tolerancia de las temperaturas bajas). Esta semilla se divide a su vez en tres subgrupos, cada uno constituido por plantas en diferente estado de desarrollo:
  - en el primero se evalúan las plántulas, en el segundo las semillas y en el tercero se evalúan más adelante, en su estado reproductivo, los individuos de los dos subgrupos anteriores que muestren tolerancia del frío;
  - las plántulas del primer subgrupo que toleren el frío se llevan al campo, y continúan el avance generacional (con las respectivas evaluaciones) hasta la generación F_5; con plantas de esta generación se conforma el VIOFLAR Templado.
- *Grupo 2:* para evaluación respecto a la calidad del grano. Esta evaluación consiste en determinar el contenido de amilosa del grano y el tipo de grano (largo, corto, etc.). Además, con los datos de centro blanco de la F_2 se eliminan las familias en que este valor sea mayor que 0.8.
- *Grupo 3:* para conformación de los viveros de observación VIOFLAR F_3, que se envían a los socios colaboradores del Cono Sur de América Latina; allí se evalúan los materiales en varias localidades y con fechas de siembra tempranas.

Generaciones F_4 o F_5: Retornan a Colombia para evaluación y avance de generaciones.

Evaluación en condiciones controladas

Era necesario desarrollar una *metodología de evaluación* en un ambiente controlado, porque la acción de la temperatura en el campo es impredecible y dificulta y encarece la selección de los materiales. Esta metodología considera las etapas del cultivo y consta de los siguientes pasos:

En la etapa de germinación
Las semillas de arroz se seleccionan y se desinfectan con hipoclorito, se acomodan sobre tiras de papel humedecidas con una mezcla de agua destilada y un fungicida; se colocan luego en una bandeja cubierta con una bolsa plástica, y se llevan a germinar (junto con los testigos) a una temperatura de 12 °C durante un período de 18 a 21 días.

La evaluación se realiza cuando el 80% de las semillas del testigo tolerante del frío (Quilla 66304) tenga un coleóptilo de 5 mm de longitud (o mayor que 5 mm) y las del testigo susceptible (Oryzica 1) no presenten elongación del coleóptilo (Cruz, 2004). La evaluación consiste en medir

los coleóptilos de las semillas, y las líneas en que más del 60% de sus semillas tengan un coleóptilo de 5 mm de longitud (o mayor) se consideran tolerantes del frío en la germinación.

En la etapa de plántula
Se someten plantas de 21 días de edad (de 3 a 4 hojas) a 5 °C durante 32 horas; 7 días después de este tratamiento se evalúan, en condiciones normales (24 °C), aplicando una escala visual de daño que va de 1 a 9 (donde 1 y 3 indican planta tolerante, 5 intermedia, y 7 y 9 susceptible). Las plantas del testigo tolerante (Quilla 64117) deben recibir calificaciones de 1 ó 3, y las del testigo susceptible (Oryzica 1) deben calificarse con 7 ó 9; en caso contrario, la evaluación no es confiable.

En la fase reproductiva
Las plantas de los genotipos que se evalúan se dividen en dos grupos: en uno se someten a 5 °C durante 32 horas, y en el otro se usan como testigos, en condiciones normales (24 °C), para poder comparar un mismo genotipo con estrés por el frío y sin ese estrés. En cada grupo evaluado se siembran además genotipos de reacción conocida (L3616 y L2825-CA), que sirven como testigos tolerantes. Como control del tratamiento se incluye un material susceptible (Oryzica 1) para garantizar la existencia del estrés.

Después del tratamiento con frío antes indicado, todos los materiales se dejan en una casa de malla (24 °C); una vez culmine su ciclo de desarrollo, se cosechan dos panículas por planta previamente identificadas, se determina en ellas el porcentaje de esterilidad del grano, y se pesan los granos llenos de cada panícula; se obtiene así un *índice de tolerancia del frío* (I):

$$\boldsymbol{I = IT \times CP} \qquad \textit{donde:}$$

$$IT = \frac{IT_i}{IT_c} = \frac{\textit{Tolerancia del frío del Genotipo } i}{\textit{Tolerancia del frío de los Testigos}}$$

$$IT_i = \frac{G_{ci}}{G_i} = \frac{\textit{Genotipo } i \textit{ en condiciones de frío}}{\textit{Genotipo } i \textit{ en condiciones normales}}$$

$$IT_c = \frac{C_c}{C} = \frac{\textit{Promedio de genotipos testigo en frío}}{\textit{Promedio de genotipos testigo en condiciones normales}}$$

$$CP = \frac{G_i}{C} = \frac{\textit{Genotipo } i \textit{ en condiciones normales}}{\textit{Genotipos testigo en condiciones normales}}$$

Condiciones normales: 24 °C. Genotipos testigo tolerantes: L2825-CA y L3616.

El índice I comprende la reacción al frío y un componente del rendimiento obtenido en condiciones normales. Los genotipos seleccionados como tolerantes tienen un índice I cercano a la unidad. Los cálculos se hacen utilizando el peso de los granos llenos dada la alta correlación (0.97) entre esta variable y el número de granos llenos por panícula en condiciones de estrés. El tratamiento con frío puede aplicarse tanto en la etapa de embuchamiento como cuando el 25% de la panícula ha salido de la hoja bandera.

Resultados del programa de mejoramiento

En el primer año del programa (2001) se caracterizaron las fuentes de tolerancia con las que se iniciaron los cruzamientos. Un año y medio más tarde se logró sembrar las primeras poblaciones tolerantes del frío en la etapa de germinación, en el Cono Sur; estas poblaciones habían sido obtenidas rápidamente por medio de mejoramiento tradicional y cultivo de anteras (FLAR, 2004).

En los 7 años siguientes se han hecho 2640 cruzamientos, un promedio de 300 cruzamientos triples y 50 simples por año. Se desarrollaron tres metodologías de evaluación de la respuesta al frío: una para la germinación, otra para la etapa de plántula y otra para la etapa de floración. En esta última se empezará a trabajar con marcadores moleculares porque la evaluación fenotípica es dispendiosa.

El programa avanza positivamente. Los viveros más recientes tienen un material cuyo ciclo de vida se ajusta más al que requieren los socios colaboradores, sus panículas son de buen tamaño, la calidad de su grano ha mejorado, y se mantienen fuertes en el plano sanitario. Han mejorado también en su potencial de rendimiento, aunque aún no superan mucho a los testigos locales.

El programa brinda además a los socios colaboradores un flujo continuo de germoplasma que amplía la base genética de sus propios programas; cumple así con el objetivo de colaborar en la obtención de nuevas variedades mejoradas. Se han recibido los siguientes reportes de los socios:

- **Argentina.** Para la zafra 2007/2008 se manejan los siguientes materiales:
  - 1 línea en las etapas finales de evaluación de los Ensayos Regionales; se está multiplicando semilla con posibilidades de ser lanzada en el 2011;
  - 3 líneas en las etapas finales de evaluación de los Ensayos Regionales; están en su primer año;
  - 30 líneas en distintas etapas de evaluación intermedia y 120 líneas en evaluación preliminar.

- **Brasil.** Para la zafra 2007/2008 se manejan los siguientes materiales:
  - 4 líneas en ensayos avanzados, 19 líneas en ensayos preliminares y 4 líneas en ensayos de época de siembra;
  - hay también 45 líneas en parcelas de observación.

- **Uruguay.** Se manejan los siguientes materiales:
  - 1 línea en la evaluación nacional de cultivares; está en su primer año;
  - 17 líneas en la evaluación avanzada, 30 líneas en la evaluación intermedia y 35 líneas en la evaluación preliminar.

El continuo progreso del programa permitirá dar un mejor servicio a los programas de mejoramiento de los socios colaboradores. Se han obtenido resultados que representan un acercamiento efectivo a la solución de una de las limitaciones

más serias del arroz en las zonas frías subtropicales.

Referencias bibliográficas

Alvarado, J.R.; Grau, P. 1991. Mejoramiento del arroz en Chile por tolerancia a frío. In: Diálogo XXXIII: Mejoramiento de arroz. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA), Montevideo, Uruguay. p. 105-114.

Alvarado, R. 1999. Influence of air temperature on rice population length of period from sowing to flowering and spikelet sterility. Cartel presentado en la Second Temperate Rice Conference reunida en Sacramento, California, del 13 al 17 de junio de 1999. Universidad de California, Davis, CA, EE.UU.

Anand, G.; Amirthadevarathinam, A.; Rogbell, E. 1999. Combining ability and heterosis for cold tolerance in rice. Oryza 36(2):114-117.

Blanco, P.; Gaggero, M.; Ávila, S.; Lavecchia, A.; Marchesi, C.; Pérez de Vida, F. 2000. Mejoramiento genético: Evaluación final de cultivares en época de siembra. In: Arroz Resultados Experimentales 1999-2000. Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (INIA), Montevideo, Uruguay. p. 4-10.

Blanco, P.; Gaggero, M.; Pérez de Vida, F.; Ávila, S.; Zorrilla, G.; Lavecchia, A.; Maerchesi, C.; Capdevielle, F.; Castillo, A. 2003. Desarrollo de cultivares en el programa de mejoramiento genético de arroz de INIA–Uruguay. In: Memorias de la 3a. Conferencia Internacional de Arroz de Clima Templado reunida en Uruguay. Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (INIA), Montevideo, Uruguay.

Chung, G.S. 1979. The rice tolerance program in Korea. In: Informe de un taller sobre tolerancia del frío en arroz. International Rice Research Institute (IRRI), Los Baños, Filipinas. 139 p.

Cruz, R.P. da. 2003. Evaluation of the cold tolerance for the genotypes of the international rice cold tolerance nursery at the germination stage. In: Memorias de la Tercera Conferencia Internacional de Arroz de Clima Templado reunida en Uruguay. Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (INIA), Montevideo, Uruguay.

Cruz, R.P. da. 2001. Tolerancia ao frio em arroz irrigado: Metodologias de avaliação e bases genéticas. Tesis (Doctorado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Faculdade de Agronomia, Porto Alegre, Brasil. 158 p.

Cruz, M. 2004. Metodologías para evaluación de tolerancia al frío en las etapas de germinación y floración del arroz (*Oryza sativa* L.) y estudio genético del estrés producido por el frío en la etapa de germinación. Tesis (Maestría). Universidad del Valle, Cali, Colombia. 99 p.

Cruz, M.; Pulver, E.; Jennings, P.; Berrío, L.; Blanco, P.; Rosso, A.; Marassi, J. 2001. Identificación de materiales genéticos de arroz por tolerancia de temperaturas bajas. In: Memorias del II Congresso Brasileiro de Arroz Irrigado y XXIV Reunião da Cultura do Arroz Irrigado celebrados en Porto Alegre–RS, Brasil. Porto Alegre, Brasil. p. 15-17.

Deambrosi, E.; Méndez, R.; Roel, A. 1997. Estrategia en la producción de arroz para un mejor aprovechamiento de las variables climáticas. Serie Técnica INIA (Uruguay) No. 89.

Farrell, T.C.; Fox, K.; Williams, R.; Fukai, S. 2001. The cost of low temperature to the NSW rice industry. Memorias de la 10th Australian Society of Agronomy Conference, Hobart, Australia. Disponible también en: www.regional.org.au/au/asa/2001

Farrell, T.C.; Fox, K.; Williams, R.; Reinke, R.; Fukai, S.; Lewin, L. 2003. Reducing cold damage in Australia. In: Memorias de la Tercera Conferencia Internacional de Arroz de Clima Templado reunida en Uruguay. Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (INIA), Montevideo, Uruguay.

FLAR (Fondo Latinoamericano para Arroz de Riego). 2000. Evaluation for cold tolerance in the germination stage; a preliminary report.

FLAR (Fondo Latinoamericano para Arroz con Riego). 2004. Actividades del programa de mejoramiento de arroz para la zona templada de América Latina. Foro Arrocero Latinoamericano 10(20):24-25.

Handani, A.R. 1979. Low temperature problems and cold tolerance research activities for rice in India. In: Report of a rice cold tolerance workshop. International Rice Research Institute (IRRI), Los Baños, Filipinas. 139 p.

Jennings, P.R.; Coffman, W.R.; Kauffman, H.E. 1985. El mejoramiento del arroz. In: Tascón, E.; García, E. (eds.). Arroz: Investigación y producción. Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT) y Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD), Cali, Colombia. p. 205-231.

Kariya, K. 2003. Chilling injuries in reproductive phase of rice plants. National Agricultural Research Center for Hokkaido. In: Memorias de la Tercera Conferencia Internacional de Arroz de Clima Templado reunida en Uruguay. Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (INIA), Montevideo, Uruguay.

Maekawa, M.; Kariya, K.; Satake, T.; Kita, T. 1987. Gene analyses on cold resistance in foreign rice cultivar. Japanese Journal of Breeding 37(Suppl. I):184-185.

Mackill, D.J.; Lei, X. 1997. Genetic variation for traits related to temperate adaptation of rice cultivars. Crop Science 37: 1340-1346.

McKersie, B.D. 1996. Chilling stress. Department of Crop Science, University of Guelph. Disponible en: www.agronomy.psu.edu

Mejía, O. 1988. Identificación de metodologías para la evaluación de la tolerancia de temperaturas bajas en arroz (*Oryza sativa* L.). Tesis (Ing. Agrónoma). Facultad de Agronomía, Universidad Nacional de Colombia, Palmira, Colombia. 123 p.

Nishiyama, I.; Hayase, H.; Satake, T. 1969. Protecting effect of temperature and depth of irrigation water from sterility caused by cooling treatment at the meiotic stage of rice plants. Proceedings of the Crop Science Society of Japan 38:554-555.

Okuno, K. 2003. Genetics and genomics of cold tolerance in rice: Informe del National Agricultural Research Center for Hokkaido Region. In: Memorias de la Tercera Conferencia Internacional de Arroz de Clima Templado reunida en Uruguay. Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (INIA), Montevideo, Uruguay.

Reyes, B.G.; Morsy, M.; Gibbons, J. 2003. Low temperature stress-induced gene expression in rice seedlings: Tools for transcription analysis. In: Memorias de la Tercera Conferencia Internacional de Arroz de Clima Templado reunida en Uruguay. Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (INIA), Montevideo, Uruguay.

Salahuddin, A.B.M.; Vergara, B.S. 1974. Criteria for screening rice cultivars resistant to low water temperature at seedling stage. Sabrão Journal 6(2):151-156.

Satake, T. 1976. Sterile-type cool injury in paddy rice plants. Memorias del Symposium on Climate and Rice. International Rice Research Institute (IRRI), Los Baños, Filipinas. p. 281-300.

Satake, T.; Jayase, H. 1970. Male sterility caused by cooling treatment at the young microspore stage in rice plants; estimations of pollen developmental stage and the most sensitive stage to coolness. Proceedings of the Crop Science Society of Japan 39:468-473.

Shibata, M. 1979. Progress in Verdín cold tolerant rice in Japan. In: Informe del Rice Cold Tolerance Workshop. International Rice Research Institute (IRRI), Los Baños, Filipinas. 139 p.

Shibata, M.; Sasaki, K.; Shimzazaki, Y. 1970. Effects of air temperature and water temperature on the percentage of sterile grains. Proceedings of the Crop Science Society of Japan 39:401-408.

Terres, A.L. 1991. Revisão sucinta dos efeitos do frio em arroz (*Oryza sativa* L.). In: Diálogo XXXIII: Mejoramiento de arroz. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA), Uruguay. Montevideo, Uruguay. p. 91-103.

Toriyama, K. 1962. Studies on the low temperature tolerance of rice cultivars, with special references to testing methods and incidences of delayed heading. Bulletin of the Aomori Agricultural Experimental Station 7:109-153.

Vargas, J.P. 1985. El arroz y su medio ambiente. In: Tascón, E.; García, E. (eds.). Arroz: Investigación y producción. Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT) y Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD), Cali, Colombia. p. 19-35.

Yordanov, I.; Velikova, V. 2000. Photoinhibition of photosystem 1. Acad. M. Popov, Institute of Plant Physiology in Sofía, Bulgaria. Bulgary Journal of Plant Physiology 26(1-2):70-92.

Capítulo 11

Mejoramiento del arroz de secano para América Latina

Marc Châtel
Elcio P. Guimarães
Yolima Ospina
César P. Martínez
Jaime Borrero

Contenido

	Página
Resumen	191
Abstract	192
Introducción	192
Ecosistemas para el arroz de secano	193
Sabanas de América Latina	194
Limitantes principales del arroz de secano	196
Historia y objetivos del mejoramiento	196
Evaluación de germoplasma para el proyecto	197
Selección de progenitores	198
Hibridación y selección para crear variabilidad	199
Desarrollo de materiales segregantes	199
Recursos genéticos del CIRAD en América Latina	201
En los programas nacionales de mejoramiento	201
En variedades provenientes de cruces con variedades del CIRAD	203
Conclusiones	203
Agradecimientos	205
Referencias bibliográficas	205

Resumen

Se analizan los ecosistemas para el arroz de secano de América Latina y el Caribe, las limitaciones que presentan para el cultivo del arroz, y los sitios donde se evalúan y seleccionan materiales genéticos de arroz de secano del Programa de Arroz del CIAT y del proyecto de cooperación con el Centro de Cooperación Internacional en Investigación Agrícola para el Desarrollo (CIRAD), de Francia. Se describen también las actividades de mejoramiento genético convencional desarrolladas por el CIAT desde 1981, y las que realizó el CIRAD desde 1996, es decir, desarrollo de poblaciones mediante la implementación del mejoramiento poblacional y su mejora mediante la selección recurrente. También se presentan algunos datos de los avances obtenidos. Como resultado de estos proyectos de

investigación se han desarrollado líneas de elevado potencial productivo y se han liberado nuevas variedades comerciales rápidamente adoptadas por los agricultores. Con ellas se han abierto nuevas fronteras agrícolas en los Llanos Orientales y en la costa norte de Colombia, se ha estimulado la producción del arroz de secano en Brasil y se han ofrecido alternativas al cultivo de arroz de secano en Bolivia.

Abstract

Improving upland rice for Latin America

The ecosystems for upland rice in Latin America and the Caribbean and their limitations for rice cultivation are analyzed. The sites where the CIAT rice program and the collaborative project that the Center carries out with the French Agricultural Research Centre for International Development (CIRAD) evaluate and select genetic materials for upland conditions are also described, as well as the conventional genetic improvement activities carried out by CIAT since 1981 and those carried out by CIRAD since 1996. These activities include population development through population improvement and recurrent selection. The advances made so far are reported. As a result of these research projects, lines have been developed that present high yield potential and new commercial varieties have been released that have been quickly adopted by farmers. This has allowed the opening of new agricultural frontiers in Colombia's Eastern Plains, and northern coast regions. In Brazil, the production of upland rice has been stimulated and, in Bolivia, alternatives to upland rice cultivation are being offered.

Introducción

En América Latina y el Caribe (ALC) se produce arroz (ver **Introducción** de esta obra) en fincas medianas y grandes y aplicando diversos sistemas de producción, desde el cultivo intensivo con riego controlado (rinde 10 t/ha) al de secano muy extensivo, como en Brasil, o de pequeño agricultor (rinde 3 t/ha), como en América Central. Los factores principales que determinan la elección de uno u otro sistema son: el régimen de lluvias, el costo del riego, el tipo de suelo, la topografía del terreno y la infraestructura disponible.

Más del 70% del área sembrada con arroz en América Latina se cultiva en el sistema de secano. En el taller sobre arroz de secano reunido en Bouaké, Costa de Marfil, en octubre de 1982, se definió así ese cultivo:

> *es el cultivo de arroz que depende exclusivamente de la lluvia, y que se siembra en suelos bien drenados, sin caballones o bordes, donde normalmente el nivel freático no aporta humedad al cultivo.*

Es una definición estricta que corresponde, en ALC, al secano no favorecido o al secano de sabana, y se aplica bastante bien a la mayor parte del área sembrada con arroz de secano. Una nueva definición ha sido introducida por el Instituto Internacional de Investigaciones sobre el Arroz (IRRI):

> es el arroz que se desarrolla en condiciones aeróbicas ('aerobic rice').

Esta definición comprende el secano de tierras altas y bien drenadas, definido en la reunión de Bouaké, y el arroz cultivado en áreas donde los campos se inundan esporádicamente en ciertas épocas por causa de la precipitación intensa y de la estructura física del suelo.

La mayor parte del área cultivada con arroz de secano en ALC está en Brasil. El sistema tiene mucha importancia en América Central (gran parte del arroz producido allí viene del sistema de secano), en Colombia, en Venezuela y en Ecuador (extensas áreas dedicadas al sistema en estos tres países), y en Bolivia (casi todo su arroz es de secano).

En este capítulo se discuten brevemente los factores que limitan el cultivo del arroz de secano, los tipos de este arroz que existen actualmente, y los sitios donde el programa de arroz del CIAT y el proyecto de cooperación entre el Centro de Cooperación Internacional en Investigación Agrícola para el Desarrollo (CIRAD), de Francia, evalúan y seleccionan materiales genéticos de arroz de secano. Se describen también las actividades de mejoramiento genético convencional desarrolladas por el CIAT desde 1981, y las que realizó el proyecto de cooperación ya mencionado desde 1996, es decir, desarrollar poblaciones mediante la implementación del mejoramiento poblacional y mejorarlas mediante la selección recurrente (ver Capítulo 12 de esta obra). Se presentan también algunos datos de los avances obtenidos.

Ecosistemas para el arroz de secano

El sistema de arroz de secano no es uniforme en ALC y, por ello, sus prácticas agronómicas y las limitantes de su producción son apenas similares en la región. Hay en ALC una diversidad de sistemas de arroz de secano que van desde los de productividad muy baja hasta los más productivos. Corresponden ellos, además, a ecosistemas donde el suelo, la pluviosidad y la distribución de las lluvias son muy variables.

Por consiguiente, la evaluación y la selección de material genético en un solo sitio no ofrecerían una solución a los problemas de todas las regiones productoras. Esta es la razón de que el programa de mejoramiento de arroz de secano del CIAT colabore con diferentes países e instituciones, principalmente Brasil, Bolivia, Colombia, Cuba, Nicaragua y Venezuela.

Las actividades de mejoramiento genético del arroz de secano del CIAT se desarrollan en Colombia en dos sitios considerados representativos de las principales regiones productoras de América Latina:

- Para ***arroz de secano de sabana:*** en la estación experimental *La Libertad* (LL), de la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (CORPOICA). La terraza alta del suelo de esta estación, cerca de Villavicencio, departamento del Meta, pertenece a un ecosistema de sabana muy favorecido en cuanto a las lluvias, pero con suelos (Oxisoles) de mucha acidez, alta saturación de aluminio y baja fertilidad.
- Para ***arroz de secano favorecido:*** en la estación experimental *Santa Rosa* (SR), situada también cerca de Villavicencio; representa un ecosistema altamente favorecido, y allí se hacen investigaciones que benefician a los Llanos Orientales de Colombia y a otras regiones de ecología similar. La distribución de las lluvias y su cantidad total en el año son adecuadas, y la fertilidad del suelo es buena.

Durante los primeros años del proyecto, se trabajó en otro sitio de selección fuera de Colombia: en Río Hato, una estación experimental del Instituto de Investigaciones Agropecuarias de Panamá (IDIAP), que pertenece a un ecosistema menos favorecido que los

anteriores en cuanto a la distribución y cantidad de lluvias y a la fertilidad del suelo, pero sin problemas de acidez.

Los análisis de suelos (Cuadro 1) indican que en LL el pH es muy ácido, el contenido y el porcentaje de saturación de aluminio son altos, y la capacidad de retención de agua de los suelos es muy baja. En ambas estaciones (LL y SR), la precipitacion total es de alrededor de 2800 mm/año y está bien distribuida durante la vida del cultivo (Cuadro 2). La presión de enfermedades severas es alta en ambas estaciones: predominan allí la piricularia, el virus de la hoja blanca, el escaldado de la hoja y el manchado del grano, entre otras.

Una diferencia fundamental de los dos sitios, observada en los primeros años de evaluación, fue la distribución de los linajes del hongo *Pyricularia grisea* Sacc. En LL predomina el linaje SRL-6, típico de las regiones de Colombia en que se cultivan arroz con riego y arroz de secano favorecido; este concepto de linajes fue desarrollado por Levy et al. en 1993. En la Altillanura, el linaje más frecuente es ALL-7, típico del cultivo de las sabanas (Correa-Victoria et al., 1994). Un ejemplo del manejo agronómico que se da a los suelos ácidos de las parcelas de selección en la LL se describe en el Cuadro 3.

La adaptación de los materiales a las condiciones locales en los países de la región latinoamericana se logra mediante una red de distribución y evaluación de ese germoplasma, ya sea en generaciones precoces o avanzadas (o en ambas), manejada entre el proyecto y las instituciones de los países de la región.

Sabanas de América Latina

El ecosistema de sabanas ocupa el área subutilizada más grande del continente

Cuadro 1. Análisis del suelo de las estaciones LL y SR, dos sitios en que se realizan los trabajos de mejoramiento genético del proyecto CIRAD/CIAT.

Sitio[a]	M.O. (%)	P Bray II (ppm)	pH	Contenido (meq/100 g)									Sat. Al (%)
				Al	Ca	Mg	K	C.I.E.	B	Zn	Fe	Cu	
EELL	4.1	7.9	4.4	3.0	0.28	0.17	0.13	3.91	0.32	0.9	118	0.44	72.4
EESR	2.3	16.1	5.1	0.8	2.9	0.20	0.18	3.73	0.20	1.5	38	1.8	-

a. EELL = Estación Experimental La Libertad, en Villavicencio, Colombia.
EESR = Estación Experimental Santa Rosa, en Villavicencio, Colombia.

Cuadro 2. Datos climáticos del período de cultivo del arroz en las estaciones LL y SR, donde se hace el trabajo de mejoramiento genético de las líneas de secano (promedio varios años).

Variable climática	Dato en el mes						
	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Sep.	Total
Precipitación (mm)	252.0	454.5	242.5	268.5	257.2	381.0	1855.7
Diás de lluvia (no.)	11	15	11	15	10	9	71
Temperatura máxima (°C)	30.9	30.3	30.3	28.6	30.9	31.7	-
Temperatura mínima (°C)	21.2	20.2	20.3	20.1	20.3	20.3	-
Humedad relativa (%)	68.6	101.7	75.2	78.5	69.9	74.6	-

Cuadro 3. Manejo agronómico de las parcelas experimentales en la estación LL.

Práctica y actividades	Dosis (kg/ha)	Ejecutado en:
Preparación del suelo		
• Pase de cincel cruzado		Nov.-Dic.
• Pase de rastra		Marzo
• Aplicación de cal dolomítica (fertiliza con Ca y Mg)		Marzo
– Se incorpora con rastra a baja traba		
Siembra de variedades esparcidoras **de inóculo**		Marzo
Para hacer evaluación de enfermedades; se dispone perpendicularmente al material sembrado		
• Alta densidad de semilla de la mezcla de variedades	300	
• Fertilización		
– Superfosfato triple (P_2O_5)	60	
– Cloruro de potasio (K_2O)	60	
– Sulfato de zinc	5	
– Urea	600-800	
Fertilización antes de la siembra (presiembra)		Abril
Se incorpora con pase de rastrillo		
• Superfosfato triple (P_2O_5)	70	
• Cloruro de potasio (K_2O)	35	
Siembra del material del ensayo		Abril
Fertilización después de la siembra (post-siembra)		Mayo-Junio
Se aplica en tres tiempos: 20, 35 y 45 días después de la siembra		
• Cloruro de potasio (K_2O)	35	
• Urea (también en tres aplicaciones)	80	
Control de malezas		Abril-Mayo
Con productos agroquímicos		

latinoamericano (Cole, 1986). Son 180 millones de hectáreas en el Cerrado de Brasil, 17 en los Llanos Orientales de Colombia, 28 en los Llanos de Venezuela, 4 en Guyana y 4 en Bolivia.

En general, los *suelos* de este ecosistema son Oxisoles y Ultisoles, que son muy ácidos, tienen una alta saturación de aluminio (Al), y son deficientes en calcio (Ca), magnesio (Mg), fósforo (P), potasio (K), azufre (S) y zinc (Zn). Tienen buena estructura física, buen drenaje y buena profundidad efectiva, pero son muy frágiles y muy susceptibles de deterioro cuando se les da un manejo inadecuado. Su topografía es, en general, plana con pendientes entre 1% y 3%.

En el Piedemonte colombiano, la *precipitación* promedio durante 20 años (1970-1990), registrada en LL, ha sido de más de 1700 mm entre abril y agosto; mayo es el mes de mayor precipitación (428 mm). En la finca Santa Cruz, a 1 km de la finca Matazul (localidad donde se hicieron evaluaciones del programa de mejoramiento), en la Altillanura colombiana, los registros de precipitación anual van de 227 mm en abril a 453 mm en septiembre. La temperatura del Piedemonte oscila entre 21 y 33 °C y su humedad relativa es de alrededor de

80% durante el tiempo de cultivo del arroz. La precipitación disminuye hacia el oriente, donde se extiende la gran planicie de los Llanos.

Estas características o similares se repiten en los Llanos de Venezuela y en gran parte de los Cerrados de Brasil; en esta última región, el período lluvioso va de octubre a marzo. En general, el ecosistema de sabanas presenta muchas similitudes en diferentes sitios, y permite ver el mejoramiento del arroz que se cultiva en suelos ácidos como un trabajo amplio y aplicable a la mayoría de las zonas arroceras, potenciales y presentes, de América Latina.

Limitantes principales del arroz de secano

Los factores que limitan el arroz son más intensos en el sistema de secano que en el sistema con riego, porque en éste la inundación permanente elimina la sequía, aumenta la disponibilidad de algunos nutrientes, disminuye las deficiencias nutricionales, reduce las pérdidas de nitrógeno y facilita el control de las malezas. También reduce la incidencia y la severidad de ciertas enfermedades fungosas, como *Pyricularia oryzae, Rhynchosporium oryzae* (escaldado de la hoja), manchado del grano y otras plagas.

En casi todos los países productores de arroz de secano de América Latina se han identificado tres grandes limitantes de la producción del cereal:

- De tipo ***agronómico***, como el control de malezas y del arroz rojo, las épocas y los métodos de fertilización, la cantidad de fertilizantes que conviene aplicar, las fechas y los métodos de siembra, y los tiempos y métodos de preparación del suelo.
- De tipo ***sanitario y fisiológico***, como la falta de resistencia estable y duradera a piricularia, y la falta de tolerancia al estrés debido a factores del suelo y a la escasez de agua (en variedades de rendimiento alto).
- De tipo ***sanitario localizado***, como la presencia de enfermedades menos diseminadas que la piricularia, las cuales ocasionarían grandes pérdidas en localidades específicas, como el escaldado de la hoja (*R. oryzae*), el manchado o decoloración del grano (causado por varios patógenos) y el virus de la hoja blanca; asimismo, la presencia de plagas como *Tagosodes oryzicolus,* las chinches del grano y los barrenadores del tallo.

Historia y objetivos del mejoramiento

El mejoramiento del arroz que se cultiva en las sabanas de suelos ácidos ha sido parte del programa de arroz del CIAT desde 1981. Diez años más tarde (1991), el CIAT estableció una alianza con el CIRAD, centro que había adquirido una larga experiencia en el desarrollo de variedades de arroz de secano tanto en África occidental (desde los años 60) como en Brasil, país donde desarrolló (de 1981 a 1991) un proyecto colaborativo de mejoramiento con el Centro de Arroz e Feijão de Embrapa. El CIAT y el proyecto CIRAD/CIAT se concentraron en los ecosistemas de secano que han sido favorecidos principalmente por las lluvias.

Se desarrolló luego una *estrategia de mejoramiento* que comprendía los siguientes aspectos: los objetivos del proyecto, el germoplasma disponible, la posibilidad de poner en práctica nuevos métodos de mejoramiento, la capacidad de los programas nacionales interesados en esa tecnología, y la disponibilidad de los recursos.

El *objetivo central* del proyecto, para el ecosistema mencionado, es desarrollar líneas que tengan las siguientes características: tolerancia de los suelos ácidos, resistencia a varias enfermedades (en especial, la causada por el hongo *Pyricularia grisea* Sacc.) y a varias plagas (en particular, a *Tagosodes oryzicolus*), precocidad (ciclo de cultivo de cerca de 100 días), buen tipo de grano y un potencial de rendimiento alto.

Los objetivos del proyecto, tanto para otros ecosistemas de secano favorecido como para el de sabana, se resumen en el Cuadro 4 y están relacionados con los requerimientos de las variedades de arroz de secano.

Evaluación de germoplasma para el proyecto

El plan de este proyecto de mejoramiento fue el siguiente:

- Comenzar con la evaluación de materiales segregantes y de líneas avanzadas provenientes del programa de mejoramiento de arroz con riego del CIAT.
- Trabajar, simultáneamente, en la introducción, la colección y la evaluación de variedades de arroz de secano, con las cuales iniciaría más tarde una etapa de hibridación para crear nueva variabilidad.
- Iniciar, en 1992, como proyecto CIRAD/CIAT, el mejoramiento convencional, aplicándose, desde 1995, a la creación de poblaciones 'multiparentales' y a su mejoramiento por selección recurrente (ver Capítulo 12 de esta obra).

Las experiencias de los programas de mejoramiento del IITA (Nigeria) y del IRAT (Costa de Marfil) indican que el *tipo de planta* enano (o semienano), de buen macollamiento, y de raíces delgadas, abundantes y superficiales —que es muy apropiado para el cultivo con riego y para el de secano muy favorecido— no es apto para los suelos de sabana. Los experimentos hechos durante varios

Cuadro 4. Características deseables en las variedades que se mejoran para las condiciones de secano favorecido y de secano de sabana.

Para secano favorecido	Para secano de sabana
1. Buen vigor, estatura de semienana a intermedia	1. Tipo de planta intermedio
2. Resistencia al vuelco	2. Crecimiento inicial vigoroso; macollamiento intermedio
3. Ciclo vegetativo de 110 a 130 días	3. Ciclo vegetativo de 100 a 130 días
4. Buen potencial de rendimiento (de 4 a 6 t/ha)	4. Buen potencial de rendimiento (de 4 a 6 t/ha)
5. Resistencia estable a piricularia	5. Resistencia estable a piricularia
6. Tolerancia de las otras enfermedades	6. Tolerancia de las otras enfermedades
7. Resistencia a *Tagosodes oryzicolus* y al virus de la hoja blanca	7. Resistencia a *T. oryzicolus* y al virus de la hoja blanca
8. Tolerancia de problemas del suelo	8. Tolerancia de la ácidez del suelo y de la toxicidad debida al aluminio
9. Buen desarrollo de las raíces	9. Raíces gruesas y profundas
10. Grano de tipo largo y fino, pesado y con porcentaje de amilosa intermedio	10. Grano de tipo largo y fino, pesado y con porcentaje de amilosa intermedio
11. Alta fertilidad de las espiguillas	11. Alta fertilidad de las espiguillas

semestres en las condiciones de sabana de la LL han confirmado ese resultado.

Las actividades se iniciaron con la evaluación de alrededor de 1200 cultivares —entre los que había líneas mejoradas, variedades nativas y materiales tradicionales introducidos de Brasil, de los centros internacionales de investigación agrícola (IRRI, IRAT e IITA), y de algunos programas nacionales— con el fin de identificar el *germoplasma adecuado* para iniciar un programa de mejoramiento. Se aplicó un diseño de campo de 'franjas ácidas' que consta de dos bandas, una de alta acidez y otra de baja acidez. Esta última se obtuvo aplicando 3 t/ha de cal dolomítica 15 días antes de la siembra, lo que aumentó el pH del suelo y neutralizó su exceso de aluminio; la banda de acidez alta no recibió cal. Los datos del ensayo obtenidos en la LL indican lo siguiente:

- Los materiales muestran buena adaptación, buen tipo de planta y un potencial de rendimiento moderado en suelos de sabana; también toleran la toxicidad debida al aluminio (Cuadro 5).
- Las variedades IRAT 120, IRAT 121, IRAT 122, IRAT 123, IRAT 124 y la línea Colombia 1/M312A (IRAT 216) son bastante resistentes al virus de la hoja blanca; este resultado provino de estudios hechos en la estación CIAT-Palmira.

Con estos materiales se constituyó un germoplasma más ajustado al nivel de calidad exigido por el proyecto, tolerante de enfermedades, con el potencial de rendimiento deseado y adaptado a suelos ácidos e infértiles. Se identificaron luego posibles progenitores para hacer cruces con otros materiales, creando así nueva variabilidad.

Selección de progenitores

La selección de los progenitores es, sin duda, la etapa más importante de cualquier proyecto de mejoramiento, porque su resultado final (las nuevas variedades) depende del contenido

Cuadro 5. Líneas avanzadas del programa de mejoramiento del CIAT en 1984, que demostraron buena adaptación a los suelos de sabana en la estación LL.

Línea	Origen	
	Institución	País
Tox 891-212-2-102 Tox 1010-22-7-1B Tox 1010-49-1 Tox 1815-34-201-201-1 Tox 1780-5-7 Tox 1781-15-1	IITA	Nigeria
IRAT 194-1-2-B IRAT 146 Colombia 1/M312A (IRAT 216)	CIRAD (IRAT)	Costa de Marfil
IRAT 122	CIRAD (IRAT)	Madagascar
IAC 164 IAC 5032	IAC Campinas	Brasil
IAC 25/PJ-110-99-1-4-1 0S6/IRAT 13-Al-1CM-1JM	INIA	México

genético de los progenitores y de sus recombinaciones.

Vivero de progenitores posibles
El germoplasma disponible se evalúa cada año respecto a las características prioritarias del proyecto. De este material se escoge el que tenga mayor potencial, y éste se evalúa más detalladamente en los años siguientes. Las introducciones son originarias, generalmente, de Brasil, Filipinas y Costa de Marfil; de éstas se eligen las líneas tolerantes de suelos ácidos y de piricularia, cuyo ciclo esté entre 80 y 120 días, de buenas características agronómicas, y de buen potencial de rendimiento. Estos mismos parámetros sirven para seleccionar materiales en las generaciones segregantes. La información derivada de estas pruebas se combina, y con ella se seleccionan los progenitores que participarán en los cruzamientos que ofrezcan el mejor pronóstico.

En la *evaluación agronómica* de estos materiales se miden los parámetros exigidos por los estándares internacionales (IRRI, 1988), que son los siguientes (dds = días después de la siembra):

- reacción a piricularia de la hoja a los 30, 37 y 42 dds;
- vigor a los 45 y 60 dds;
- reacción a la acidez a los 45 y 60 dds;
- helmintosporiosis y escaldado de las hojas al momento de la floración;
- número de días desde la siembra hasta el 50% de la etapa de floración;
- reacción a piricularia del cuello de la panícula, 30 días después de la floración;
- altura de las plantas en la fase de maduración;
- manchado del grano en la maduración;
- tipo de planta descrito en todas las etapas del crecimiento;
- tipo de grano.

Para evaluar la tolerancia del suelo ácido, se aplicó el método de las franjas ácidas (ver antes) cuyo fin es identificar las líneas que tengan un comportamiento similar en las dos franjas. Se hace seguimiento a la prueba de acidez sembrando un testigo susceptible (CICA 8).

Hibridación y selección para crear variabilidad

La hibridación controlada y la selección, dos métodos convencionales de mejoramiento, permiten crear variabilidad genética. El éxito de ambos trabajos depende del buen conocimiento que debe tener el fitomejorador de los progenitores que maneja, lo que le permite decidir la clase de cruzamientos que tiene más probabilidad de producir los resultados deseados.

Se combinan los progenitores que poseen, en general, buenas características agronómicas, aunque sean deficientes en uno u otro carácter. Ahora bien, conseguir progenitores que sean complementarios para todas las características deseables es una tarea prácticamente imposible; por tanto, el objetivo de esta etapa del trabajo es combinar padres que produzcan segregantes que, se supone, cumplirán los principales objetivos del programa de mejoramiento.

Desarrollo de materiales segregantes

El flujo de estos materiales segregantes, que se desarrollan por el método genealógico, fue resumido por Guimarães et al. en 1995; en este capítulo se describen las etapas de ese flujo.

Generaciones impares (F_1, F_3, F_5 y F_7)
Coresponden a un avance de generación en el proceso de fijación génica, avance que se lleva a cabo en la segunda época de cultivo del año. El trabajo con estas

generaciones comprende los siguientes pasos:

- Se hace en ellas una *selección de baja intensidad* respecto a características de alta heredabilidad (tipo de grano, duración del ciclo de cultivo, tipo de planta, etc.).
- En las generaciones más avanzadas (F_5 y F_7), este proceso sirve también para *incrementar la semilla* que se necesitará en el análisis de calidad (por tamaño del grano, centro blanco, temperatura de gelatinización y contenido de amilosa) y en las futuras siembras multilocales.
- La generación F_7 es un caso especial: en ella, los materiales son *casi homocigotos* y estan listos para las pruebas de rendimiento y para ser distribuidos a los programas nacionales. Se hace una *multiplicación* con la intención de obtener 10 kg de cada material, parte de los cuales se destina a las pruebas de molinería.

Los materiales seleccionados en esta última generación se incluyen en los ensayos preliminares de rendimiento, y se agrupan en los Viveros Internacionales de Observación (CIAT-ION).

Generaciones pares (F_2, F_4, F_6 y F_8)
Estas generaciones se siembran en la estación LL para evaluarlas bajo condiciones de suelos ácidos.

- En la F_2 se siembran de 3000 a 5000 plantas por cruzamiento, en surcos, con baja densidad de siembra para individualizar las plantas durante todo su desarrollo. Se *seleccionan plantas individuales* según las siguientes características: resistencia a enfermedades, precocidad, buen tipo de grano, altura de planta intermedia, y tipo de planta que compita bien con las malezas y tenga un alto potencial de rendimiento. Puesto que algunos de estos caracteres son de baja heredabilidad, esta selección busca desarrollar líneas para la evaluación que se hará en las generaciones siguientes.
- Las generaciones F_4 y F_6 se siembran en parcelas de dos surcos de 5.0 m, trazados a 0.26 m uno de otro, y con baja densidad de siembra (en particular, en la F_4). Se seleccionan las *mejores líneas* según los datos obtenidos de las observaciones, y entre ellas se seleccionan algunas plantas individuales.

Ensayos de comportamiento
En la etapa final del desarrollo de los materiales antes descritos se intenta conocer su comportamiento en parcelas de mayor tamaño y con mayor precisión estadística. Se hacen, por tanto, tres tipos de ensayos en diferentes localidades: de observación, preliminares, y avanzados (respecto al rendimiento). Se analizan primero en esta etapa los datos de plantas individuales y luego se combina esta información.

Las líneas de mayor potencial se entregan a la institución nacional de investigación que las solicite, para que sean evaluadas a nivel regional; las que satisfacen allí los requisitos locales pueden recomendarse como variedad comercial.

Vivero Internacional de Observación
El proyecto de mejoramiento genético del arroz de secano pertenece al ámbito regional de las sabanas de suelos ácidos de América Latina; por consiguiente, los materiales de las generaciones avanzadas que hayan alcanzado un alto nivel de homocigosis se incorporan a viveros similares a los de la Red Internacional para la Evaluación Genética del Arroz (INGER) cultivado con riego (en América Latina, esta Red se denominó INGER–LAC). Esos viveros se distribuyeron a

varios países; entre ellos, Argentina, Bolivia, Brasil, Colombia, Costa Rica, Cuba, Guatemala, Nicaragua y Venezuela.

Una vez introducido el germoplasma a través de los viveros de observación, el programa nacional de mejoramiento de arroz de cada uno de los países mencionados inició el manejo de ese germoplasma según sus prioridades y frente a las limitantes locales. El objetivo final del vivero es que algunos materiales sean liberados como variedades comerciales o utilizados localmente como progenitores en los cruzamientos que se planeaban.

Liberación de variedades

Las etapas descritas anteriormente son la 'receta de cocina': seguidas con exactitud, terminan en un plato exquisito, es decir, en las nuevas y mejores variedades comerciales que se entregan a los agricultores para que las adopten y las cultiven. La adopción de estas variedades, que son un éxito para el mejoramiento genético del arroz, permite medir el impacto real de un proyecto de mejoramiento.

El material generado en el proyecto es evaluado continuamente y los importantes resultados obtenidos en esa evaluación le han permitido al proyecto producir líneas adaptadas a las sabanas de suelos ácidos en Bolivia, Brasil y Colombia. La evaluación de líneas avanzadas, que se hace en colaboración con las instituciones locales, y el intercambio de germoplasma con otros países han permitido liberar numerosas variedades, entre ellas las siguientes:

- En Colombia se liberaron las tres primeras; dos de ellas se adaptaron a los suelos ácidos de la Altillanura plana de los Llanos Orientales y permitieron establecer sistemas agropastoriles en esa región; son las siguientes:
  - **Oryzica Sabana 6**, liberada en 1991 (Leal et al., 1991) y
  - **Oryzica Sabana 10**, liberada en 1996.

  La tercera variedad fue recomendada a los pequeños agricultores de la costa norte del país para incrementar el rendimiento del arroz a nivel local y para disponer allí de un grano de mejor calidad; es la siguiente:

  - **Oryzica Turipaná 7**, liberada en 1992 (Rivera et al., 1992).

- En Brasil y en Bolivia se liberaron numerosas variedades.
- En América Latina: una recopilación de las variedades lanzadas en esta región se presenta en la siguiente sección del capítulo.

Continúa actualmente el trabajo de aplicar el método de mejoramiento de poblaciones mediante la selección recurrente (ver Capítulo 12 de esta obra), el cual permitirá la creación de nueva variabilidad genética, su selección y la entrega de nuevas variedades comerciales a los agricultores.

Recursos genéticos del CIRAD en América Latina

El impacto de los recursos genéticos de arroz del CIRAD ha sido grande en América Latina. Durante los últimos 23 años (1982-2005) fueron puestas a disposición de los agricultores de la región latinoamericana 31 nuevas variedades, principalmente para las áreas de secano.

En los programas nacionales de mejoramiento

Las variedades del CIRAD (Châtel y Guimarães, 2003) fueron introducidas por el CIAT mediante las redes del INGER global o directamente en la relación bilateral establecida entre los países y el

CIRAD. Estas variedades fueron utilizadas como progenitores por diferentes instituciones (INGER–América Latina, 1991; Martínez et al., 1995).

Brasil

Tres centros nacionales de investigación agrícola mantienen programas de mejoramiento genético del arroz: Embrapa–Centro de Arroz e Feijão; IAC Campinas–Centro de Investigación del Estado de São Paulo; y Embrapa–Centro de Terras Baixas del Estado de Rio Grande do Sul. Las tres instituciones emplearon, en total, 53 variedades del CIRAD.

- **Embrapa–Centro de Arroz e Feijão.** Esta institución empleó la mayoría de esas variedades (50) en 511 combinaciones, 284 veces como progenitor femenino y 227 veces como progenitor masculino. Esta cifra indica que la colaboración desarrollada durante el período 1981-1991 por el proyecto Embrapa/CIRAD de mejoramiento genético de arroz de secano fue intensa.
- **IAC Campinas.** Empleó 8 de las 50 variedades manejadas por Embrapa–Arroz e Feijão. Con ellas se hicieron 77 cruzamientos; en 10 de ellos, las variedades fueron progenitor femenino y en los 67 restantes fueron progenitor masculino.
- **Embrapa–Centro de Terras Baixas.** Este centro empleó 3 variedades del CIRAD, 2 de las cuales eran diferentes de las usadas por los otros dos centros. Se hicieron 15 cruzamientos, en los que la variedad del CIRAD fue siempre progenitor masculino. Sólo se usaron tres variedades porque este Centro trabaja en mejoramiento del arroz con riego cultivado en clima templado/subtropical) y las variedades del CIRAD están adaptadas a las condiciones de secano de los trópicos.

Las variedades del CIRAD más usadas en Brasil fueron: CIRAD 2, CIRAD 13, CIRAD 101, CIRAD 112, CIRAD 177, CIRAD 195, CIRAD 216 y CIRAD 257. Tienen buen potencial de rendimiento, buen tipo de planta y son precoces, características que justifican su empleo masivo en un programa de cruzamientos.

Colombia

Durante el período 1967-1983, los cruzamientos de arroz eran definidos y realizados mediante acuerdo entre el Instituto Colombiano Agropecuario (ICA) y el CIAT. En los años siguientes se emplearon 16 variedades del CIRAD en 1092 combinaciones, 703 veces como progenitor femenino y 389 veces como progenitor masculino. Las variedades del CIRAD más usadas en Colombia fueron: CIRAD 8, CIRAD 13, CIRAD 120, CIRAD 121, CIRAD 122, CIRAD 124 y CIRAD 216.

La serie 120 de CIRAD, seleccionada en Madagascar, se usó mucho. Las variedades de esta serie fueron consideradas fuente de resistencia al virus de la hoja blanca (VHB), aunque en Madagascar, donde fueron seleccionadas, no existe este virus. Sin embargo, el CIAT identificó una fuente de resistencia al virus proveniente de Makalioka 34, una variedad cultivada en la región del Lago Alaotra. La serie 120 del CIRAD tiene como progenitor a Makalioka, el cual transmitió su resistencia a la enfermedad mencionada a su descendencia moderna mejorada.

México

El Instituto Nacional de Investigaciones Forestales y Agropecuarias (INIFAP) empleó 17 variedades del CIRAD en 277 cruzamientos.

Perú

El Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias y Agroindustriales (INIAA) empleó 8 variedades del CIRAD en 74 cruzamientos.

Ecuador
Fueron empleadas 3 variedades del CIRAD en 15 cruzamientos.

En variedades provenientes de cruces con variedades del CIRAD

Las variedades del CIRAD utilizadas por los programas nacionales han permitido obtener (mediante cruzamientos) líneas promisorias, y algunas de ellas han sido oficialmente recomendadas como cultivares (Cuadro 6).

El proyecto de colaboración entre Embrapa–Centro de Arroz e Feijão y el CIRAD hizo el mayor impacto. En 1991 se clausuró este proyecto, pero los resultados obtenidos se trasladaron al nuevo proyecto de colaboración entre el CIAT y el CIRAD, del cual Brasil sigue siendo 'cliente privilegiado' en la investigación de arroz para el sistema de secano. Las líneas y variedades del CIRAD seleccionadas y difundidas en América Latina son las siguientes:

Brasil
Durante el período 1986-2004 fueron lanzadas 15 líneas de secano, de las cuales 8 fueron seleccionadas por el proyecto Embrapa/CIRAD y 6 por el proyecto CIRAD/CIAT.

- **Líneas Embrapa/CIRAD.** Los resultados obtenidos por este proyecto entre 1981 y 1991 se resumen en la selección y liberación de ocho variedades modernas que se cultivan en el Cerrado brasileño (Châtel et al., 1982-1991). Sartori et al. (1995) describen, como ejemplo, la liberación de una variedad.
- **Líneas CIRAD/CIAT.** Durante el período 1992-2002, el 67% de las variedades de arroz de secano lanzadas en Brasil eran descendientes de cruzamientos hechos en el CIAT con variedades del CIRAD, seleccionados por el proyecto CIRAD/CIAT, y adaptados a las condiciones de Brasil (Châtel et al., 1992-1995).

Colombia: líneas CIAT y CIRAD/CIAT
Durante el período 1989-2002 fueron liberadas cinco variedades cuyos progenitores eran variedades del CIRAD: de ellas, dos fueron desarrolladas por el CIAT para variedades de arroz con riego; para el ecosistema de sabana, dos fueron desarrolladas por el CIAT (Leal et al., 1991; Rivera et al., 1992) y una por el proyecto CIRAD/CIAT.

Bolivia: líneas del CIAT
Tres variedades desarrolladas por el CIAT, cuyos progenitores eran variedades del CIRAD, fueron lanzadas en Bolivia para áreas con condiciones de secano favorecido (*CIAT*–Santa Cruz, 1994a y 1994b; Guzmán, 1995).

Guatemala: líneas del CIAT
Tres líneas desarrolladas por el CIAT y con progenitores del CIRAD fueron lanzadas en este país.

Difusión directa de las variedades del CIRAD
Cinco de estas variedades se adaptaron a las condiciones locales de cultivo y fueron liberadas como variedades comerciales en Bolivia y en Brasil (Cuadro 7).

Conclusiones

El mejorameinto genético convencional de arroz de secano para ALC ha estado a cargo del CIAT (1981-1996) y del proyecto CIRAD/CIAT (1992-fecha actual) y ha dado muchos resultados relevantes, los cuales han permitido a los países de América Latina fortalecer tanto su investigacion local como su sector arrocero.

Cuadro 6. Difusión de variedades provenientes de cruzamientos con germoplasma del CIRAD.

Variedad de secano	Lanzada en:	Progenitor(es) CIRAD
Brasil: Cruces EMBRAPA/CIRAD		
Rií Paranaiba	1986	IRAT 2
Centro América	1987	IRAT 2
Guaraní	1987	IRAT 2
Guaporé	1988	IRAT 13
Tángara	1989	IRAT 13
Douradão	1989	IRAT 2
Xingu	1989	IRAT 13
Primavera	1997	IRAT 10
Brasil: Cruces CIRAD/CIAT		
Progreso	1993	IRAT 124 e IRAT 216
Canastra	1995	IRAT 122
Maravilha	1995	IRAT 121 e IRAT 216
Bonança	1999	IRAT 124 e IRAT 216
Carisma	1999	IRAT 124 e IRAT 216
Talento	2002	IRAT 124 e IRAT 216
Curinga	2004	IRAT 13, IRAT 124 e IRAT 216
Colombia: Cruces CIAT y CIRAD/CIRAD		
Oryzica Sabana 6	1992	IRAT 216
Oryzica Aabana 10	1996	IRAT 124 e IRAT 216
Línea 30 (CIRAD 409)	2005	IRAT 124, IRAT 146 e IRAT 216
Variedades para riego		
Oryzica Llanos 4	1989	IRAT 122
Progreso 4-25	2000	IRAT 120
Bolivia: Cruces CIAT		
Para secano favorecido		
Sacia-1 (Tacu)	1993	IRAT 216
Sacia-3 (Tutuma)	1994	IRAT 124 e IRAT 216
Sacia-4 (Jisumu)	1994	CIRAD 124 e CIRAD 216
Guatemala: Cruces CIAT y CIRAD/CIRAD		
Icta Izabal	1996	IRAT 122 e IRAT 216
Masagua	2000	IRAT 122
Oasis	2000	IRAT 121

Se han desarrollado líneas de elevado potencial productivo y se han liberado nuevas variedades comerciales rápidamente adoptadas por los agricultores. Con ellas se han abierto nuevas fronteras agrícolas en los Llanos Orientales y en la costa norte de Colombia, se ha estimulado la producción del arroz de secano en Brasil, y se han ofrecido alternativas al cultivador de arroz de secano en Boliva.

Cuadro 7. Difusión directa de variedades del CIRAD.

Variedad de secano CIRAD	Nombre local	Lanzada en:
En Brasil		
IRAT 190	IREM 16 B	1982
IRAT 177	Cabaçu	1988
IRAT 216	Río Verde	1991
En Bolivia		
Para pequeños productores		
IRAT 170	Jasaye	1999
IRAT 357	Jacuú	2002

Agradecimientos

Los autores expresan un sincero agradecimiento al Dr. Surapong Sarkarung, Fitomejorador del programa de arroz del CIAT de 1984 a 1990, y a los asistentes y asociados de investigación Argemiro Moreno, Eliseo Nossa, Ana Lilia Alzate, René H. Aguirre (q.e.p.d.) y Constanza Huertas, ingenieros agrónomos del CIAT, por su dedicación al cumplimiento de la estrategia propuesta y su apoyo en la realización de las actividades requeridas.

Referencias bibliográficas

Châtel, M.; Guimarães, E.P. 2003. International partnership for rice improvement in Latin America: CIRAD, a case study. Sociedad Brasileira de Melhoramento de Plantas. Crop Breeding and Applied Biotechnology 165.

Châtel, M.; Guimarães, E.P.; Morais, O.P. de; Peixoto, O.; Castro, E.M. de. [1982-1991]. Relatorios anuales do projeto de colaboracão EMBRAPA/ IRAT-CIRAD. [p.v.]

Châtel, M.; Guimarães, E.P.; Ospina, Y. [1992-1995]. Informes anuales del proyecto colaborativo CIAT/CIRAD. Centro Internacional lde Agricultura Tropical (CIAT), Cali, Colombia. [p.v.]

CIAT-Santa Cruz (Centro de Investigación Agrícola Tropical). 1994a. Sacia 3 (Tutuma), nueva variedad de arroz para secano. Plegable de divulgación. CIAT-Santa Cruz y Agencia de Cooperación Internacional del Japón (JICA) en Bolivia. Santa Cruz de la Sierra, Bolivia. 6 p.

CIAT-Santa Cruz (Centro de Investigación Agrícola Tropical). 1994b. Sacia 4 (Jisunu), nueva variedad de arroz para secano. Plegable de divulgación. CIAT-Santa Cruz y Agencia de Cooperación Internacional del Japón (JICA) en Bolivia. Santa Cruz de la Sierra, Bolivia. 6 p.

Cole, M.M. 1986. The savannas biography and geobotany. Academic Press, Londres. 438 p.

Correa-Victoria, F.J.; Zeigler, R.S.; Levy, M. 1994. Virulence characteritics of genetic families of *Pyricularia grisea* in Colombia. In: Zeigler, R.S.; Leong, S.A.; Tang, P.S. Rice blast disease. p. 211-229.

Guimarães, E.P.; Châtel, M.; Ospina, Y.; Borrero, J. 1995. Upland rice germplasm development strategy of the Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT). International Rice Research Notes 20(2):14-15.

Guzmán, R. 1995. Nuevas variedades de arroz de secano en Santa Cruz, Bolivia. In: Resultados de la Red Internacional para la Evaluación Genética del Arroz (INGER) en América Latina, presentados en la Reunión del Comité Asesor de INGER–Global, Yangon, Myanmar, noviembre 28-30 de 1994. Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), Cali, Colombia. p. 15-19.

INGER–América Latina. 1991. Cruzamientos de arroz en América Latina. Cuevas, F. (ed.). Red Internacional para la Evaluación Genética del Arroz y Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), Cali, Colombia. 230 p.

INGER–América Latina. 1994. Informes y resultados de los viveros y de las variedades de arroz para América Latina y el Caribe de la Red Internacional para la Evaluación Genética del Arroz (INGER). Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), Cali, Colombia. 220 p.

IRRI (International Rice Research Institute). 1988. Standard evaluation system for rice. 3a. ed. Los Baños, Filipinas.

Leal, D.M.; Sarkarung, S.; Sanz, J.I.S.; Aguirre, R.H.V.; Delgado, H.H. 1991. Oryzica Sabana 6, variedad mejorada de arroz para sistemas sostenibles de producción en suelos de sabana. Plegable de divulgación no. 238. Instituto Colombiano Agropecuario (ICA), Bogotá, Colombia. 6 p.

Levy, M.; Correa-Victoria; F.J.; Zeigler, R.S.; Xu, S.; Hamer, J.E. 1993. Genetic diversity of the rice blast fungus in a disease nursery in Colombia. Phytopathology 73:645-649.

Martínez, C.P.; Cuevas, F. 1995. Registro de cruzamientos de arroz: P1 a P5617 y CT5618 y CT13800. Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), Cali, Colombia. 313 p.

Rivera, B.C.; Villadiego, G.G.; López, G.N.; Leal, D.M. 1992. Oryzica Turipaná 7, primera variedad mejorada de arroz para siembras de secano a chuzo en Colombia. Plegable de divulgación no. 257. Instituto Colombiano Agropecuario (ICA), Bogotá, Colombia. 6 p.

Sartori, M.T.R.; Barros, L.G. de; Morals, O.P. de; Sant'Ana, E.P. 1995. Progresso, cultivar de arroz de secano para las areas favorecidas de Mato Grosso. In: Resultados de la Red Internacional para la Evaluacion Genética del Arroz (INGER) en América Latina, presentados en la Reunión del Comité Asesor de INGER–Global, Yangon, Myanmar, noviembre 28-30 de 1994. Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), Cali, Colombia. p. 49-55.

Capítulo 12

Mejoramiento de poblaciones de arroz de secano empleando selección recurrente y desarrollo de variedades

Marc Châtel
Elcio P. Guimarães
Yolima Ospina
Francisco Rodríguez
Víctor Hugo Lozano

Contenido

	Página
Resumen	207
Abstract	208
Introducción	208
Conceptos básicos sobre el método	210
Evolución del trabajo	210
Estrategias de mejoramiento de poblaciones	211
Selección recurrente fenotípica masal en ambos sexos	212
Selección recurrente basada en líneas $S_{0:2}$	213
Desarrollo de líneas obtenidas de poblaciones mejoradas	214
Trabajo de selección	214
Ensayos de rendimiento	215
Selección de líneas	217
En los programas nacionales	217
En el sector comercial	218
Evaluación de la diversidad genética	221
Consideraciones finales	221
Referencias bibliográficas	222

Resumen

Se describen los nuevos métodos de mejoramiento empleados dentro del proyecto de cooperación para el mejoramiento del arroz entre el CIAT y el Centro de Cooperación Internacional en Investigación Agrícola para el Desarrollo (CIRAD), de Francia, el cual busca dos objetivos: seguir produciendo variedades mejoradas y, al mismo tiempo, ampliar la variabilidad del germoplasma que se pone a disposición de los agricultores. Las nuevas estrategias de mejoramiento que se emplean en el arroz de secano son el desarrollo de

poblaciones de amplia base genética y su mejoramiento mediante la selección recurrente. El gen recesivo de androesterilidad (ms), encontrado en un mutante de la variedad IR36, facilitó la creación de poblaciones. Se crearon así poblaciones compuestas para sitios específicos en colaboración con instituciones nacionales de investigación. En Colombia se mejoraron varias poblaciones compuestas empleando dos métodos de selección recurrente. En cada etapa del mejoramiento se seleccionaron algunas plantas fértiles, que se consideraban el punto de partida para el desarrollo de líneas segregantes y fijas mediante el método convencional de selección denominado pedigrí. Desde el año 2002, más del 90% de las líneas que están para selección provienen de las poblaciones recurrentes originales y mejoradas. Las líneas más avanzadas se evalúan actualmente en ensayos de observación y de rendimiento, en cooperación con los socios del proyecto en América del Sur (Argentina, Bolivia, Brasil, Colombia y Venezuela), América Central (Nicaragua) y el Caribe (Cuba). Ya han sido identificadas algunas líneas promisorias, que podrán convertirse en variedades comerciales.

Abstract

Improving upland rice populations using recurrent selection and varietal development
The new breeding methods used by the collaborative rice improvement project carried out by CIAT and the French Agricultural Research Centre for International Development (CIRAD) are described: development of populations with a broad genetic base and recurrent selection. This project aims to continue to develop improved varieties while broadening the variability of germplasm available to farmers. A recessive male-sterile gene (ms) found in a mutant of variety IR36 facilitated the development of the rice population. Site-specific composite populations were developed with the national agricultural research institutes. In the case of Colombia, several composite populations were improved using two methods of recurrent selection. Several fertile plants were selected at each breeding stage and then used as a starting point to develop segregating and fixed lines using the conventional pedigree method. Since 2002, more than 90% of the lines in the selection process have come from original and improved recurrent populations. The most advanced lines are currently being evaluated in observation nurseries and yield trials in collaboration with different project partners in South America (Argentina, Bolivia, Brazil, Colombia, and Venezuela), Central America (Nicaragua), and the Caribbean (Cuba). Several promising lines, which could become commercial varieties, have been identified.

Introducción

Los métodos clásicos de mejoramiento genético fueron (y todavía lo son) responsables del desarrollo y de la liberación de numerosas variedades de arroz de secano en varios países de América Latina, como Bolivia, Brasil y Colombia (INGER, 1991). Aunque esos resultados fueron muy positivos, condujeron al estrechamiento de la base genética de los productos de mejoramiento que se ofrecían a los agricultores (Cuevas-Pérez et al., 1992; Rangel et al., 1996; Montalván et al., 1998). Por consiguiente, las instituciones como el Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), establecido en Colombia, y el Centro de Cooperación Internacional en Investigación Agrícola para el Desarrollo (CIRAD), con sede en Francia, se han aplicado a la tarea de hallar nuevos métodos de mejoramiento que permitan lograr dos objetivos: uno, seguir produciendo variedades, y otro, al tiempo con el primero, ampliar la

variabilidad del germoplasma que se pone a disposición de los agricultores.

Desde 1996, el trabajo realizado dentro del convenio entre el programa de arroz del CIAT y el CIRAD (proyecto CIRAD/CIAT) ha aplicado la estrategia de disminuir la producción de líneas fijas —directamente relacionadas con el mejoramiento clásico por cruzamientos entre una línea (o variedad) del grupo japónica con otra del mismo grupo (japónica x japónica)— y de sustituirla, incrementando los recursos necesarios, por la ampliación de la base genética del arroz de secano y por el mejoramiento por el método de poblaciones (Châtel et al., 2001).

Para lograr ese objetivo del proyecto, los investigadores crearon poblaciones de amplia base genética (Châtel y Guimarães, 1998), que han sido mejoradas empleando la metodología de la selección recurrente. Para facilitar la tarea de construir y recombinar al azar los diferentes progenitores que constituyen las poblaciones dichas, se utilizó el gen recesivo de androesterilidad (ms) hallado en un mutante de la variedad IR36 de tipo índica (Singh e Ikehashi, 1981).

Si se explora la amplia variabilidad genética presente en esas poblaciones, resultarán variedades de base genética distinta de las que están hoy disponibles en el mercado latinoamericano. A ese resultado se llegará mediante la selección de plantas individuales y empleando métodos de mejoramiento como el de pedigrí, el masal, el masal modificado (ver Capítulo 9 de esta obra) o una combinación de éstos, en todas las etapas del proceso de mejoramiento de las poblaciones. El proyecto ha desarrollado en Colombia una serie de líneas segregantes; las más avanzadas están bajo evaluación en ensayos de rendimiento en varios países que tienen un ecosistema apto para el arroz de secano. Se presentan enseguida algunos resultados obtenidos en las diferentes etapas de la estrategia del proyecto CIRAD/CIAT antes mencionada:

- Han aumentado paulatinamente, desde 1997, las líneas desarrolladas por mejoramiento poblacional; en el 2002, más del 90% de las líneas fijas evaluadas y seleccionadas provenían de poblaciones que se estudiaban mediante el método de la selección recurrente.
- Para apoyar la labor de los países de la región, se crearon diversas poblaciones que fueron luego enviadas a los programas nacionales (Châtel y Guimarães, 1998), además de las líneas segregantes seleccionadas en Colombia; los socios colaboradores en esta estrategia son Argentina, Bolivia, Brasil, Colombia, Cuba, Nicaragua y Venezuela.
- China se interesó en la metodología descrita y en los materiales de secano obtenidos; se enviaron, por tanto, varias líneas y algunas poblaciones al Food Crops Research Institute, situado en la provincia de Yunnan (Tao et al., 2000).
- Cuba, en el Caribe, y otros países han solicitado poblaciones específicas para solucionar problemas locales (Polanco et al., 2000).

En este capítulo se hace un informe del uso que se da a la estrategia de mejoramiento 'poblacional' y de los avances logrados en el ecosistema de sabanas por el proyecto de arroz de secano manejado en colaboración por el CIRAD y el CIAT.

Conceptos básicos sobre el método

El mejoramiento de poblaciones por selección recurrente es un método eficiente para mejorar características cuantitativas y de baja heredabilidad; para mejorar otros caracteres de herencias más simples, hay metodologías más eficientes. El método permite lograr dos resultados positivos:

- Romper los bloques de ligamiento génico que, en el arroz, se constituyeron durante muchos años de selección y autofecundación.
- Liberar variabilidad genética mediante ciclos sucesivos de cruzamientos (o sea, por las recombinaciones).

La continua selección, generación tras generación, de los caracteres que interesan (al fitomejorador y al productor) conduce a la acumulación de genes favorables a la expresión de esos caracteres objeto de mejoramiento, es decir, a un incremento de la frecuencia génica. Puesto que este proceso acumulativo es paulatino, los resultados del método se esperan a mediano o a largo plazo, tiempo que requiere la mejora genética de las poblaciones. Se han comunicado innumerables ejemplos de la eficiencia del método, principalmente en cultivos de polinización abierta como el maíz (Jenkins, 1940) y en algunos cultivos autógamos como la soya (Piper y Fehr, 1987; Guimarães, 1985), el trigo (Altman y Busch, 1984), el algodón (Meredith y Bridge, 1971; Miller y Rawlings, 1967) y la cebada (Bajaj et al., 1990).

Puesto que hay un gen recesivo de androesterilidad en la población, ésta se comporta, en principio, como un cultivo de polinización abierta. En la floración, el polen producido por las plantas fértiles autopoliniza sus flores y, al mismo tiempo, poliniza las plantas androestériles presentes a su alrededor. Se libera así una gran cantidad de variabilidad porque se combinan varios progenitores en una misma población segregante. En general, en las etapas iniciales del proceso de mejoramiento, esas poblaciones tienen un alto nivel de segregación respecto a una gran cantidad de características; en la medida en que se avanza en el proceso, algunas características (las de control genético más simple) se fijan rápidamente y la población se vuelve más uniforme.

Se dispone, por tanto, de cierta variabilidad genética en cada generación segregante del proceso de mejoramiento poblacional; para aprovecharla, los fitomejoradores seleccionan plantas fértiles, con las cuales iniciarán un proceso de desarrollo de líneas mediante alguno de los siguientes métodos del mejoramiento clásico: el de pedigrí, el masal o el masal modificado. En este capítulo se informará sobre algunos resultados de la evaluación de poblaciones y de las líneas obtenidas empleando esos métodos.

Una de las responsabilidades del proyecto CIRAD/CIAT es el registro y la preservación de las poblaciones de arroz que existen en la región latinoamericana; para cumplirla, sus investigadores llevan al campo, cada año, algunas poblaciones sólo con el fin de cosechar las plantas androestériles recombinadas al azar. Esta tarea constituye una etapa de mantenimiento de la población. Actualmente hay poblaciones registradas (Châtel y Guimarães, 2000) que están disponibles para cualquier fitomejorador o institución interesado.

Evolución del trabajo

El objetivo principal del proyecto CIRAD/CIAT de mejoramiento poblacional del arroz de secano para el ecosistema de sabana es desarrollar, adaptar y mejorar

varias poblaciones de arroz del grupo japónica tropical. La evolución del proyecto ha sido la siguiente:

- Las primeras poblaciones de arroz de secano de América Latina fueron creadas (Taillebois y Guimarães, 1989) por el proyecto integrado por Embrapa–Arroz e Feijão, de Brasil, y el CIRAD (el IRAT, en ese tiempo), el cual duró hasta 1991.
- En 1992 se inicia el proyecto CIRAD/CIAT, en Colombia, y se introducen en este país, desde Brasil, las poblaciones básicas CNA-IRAT 5 y CNA-IRAT A. Estas poblaciones fueron sembradas en la Estación Experimental La Libertad (LL), cuyos suelos son ácidos, para determinar las capacidades y la adaptación de ese germoplasma a las condiciones de la sabana colombiana. Las observaciones de Guimarães et al. (1995) indicaron que la CNA-IRAT A era la población que, dado su potencial, se acercaba más a lo esperado; sin embargo, no poseía la variabilidad genética deseada para los objetivos prioritarios del proyecto.
- Se creó entonces una población de sitio específico, o sea, una población que, además de poseer una base genética más amplia, llevara genes de líneas élite seleccionadas localmente y dotadas de los caracteres que interesaban al proyecto. La creación de esa nueva población (PCT-4), que resultó de la introducción de variabilidad en CNA-IRAT A, y la estrategia empleada para constituirla fueron descritas por Châtel et al. (1997b). La PCT-4 fue luego utilizada como germoplasma básico para crear la población PCT-11 (Ospina et al., 2000).
- Mientras se desarrollaban las poblaciones mencionadas, se ponía en práctica la estrategia de mejorar las poblaciones del germoplasma introducido respecto a dos características prioritarias: la resistencia a la piricularia de la hoja y la tolerancia al virus de la hoja blanca (VHB), transmitido por el insecto *Tagosodes orizicolus* (Châtel et al., 1997a).
- En los últimos años, el mejoramiento de poblaciones que emplea la selección recurrente se concentró en las poblaciones desarrolladas en Colombia (PCT-4 y PCT-11) y en la CNA-7, desarrollada en Brasil; esta última presenta un tipo de planta bien adaptado al cultivo manual practicado por pequeños productores; por ejemplo, los de Bolivia.
- Al tiempo con ese trabajo, se investigó el germoplasma del proyecto como fuente de variabilidad genética, con el fin de generar líneas fijas que pudieran distribuirse entre los programas nacionales; éste es uno de los objetivos del proyecto colaborativo para la región latinoamericana. De ese germoplasma se seleccionaron plantas individuales para generar líneas segregantes, y éstas fueron seleccionadas empleando el método del pedigrí.

Estrategias de mejoramiento de poblaciones

El método de selección recurrente implica un proceso cíclico continuo que consta de tres etapas básicas:

- Selección de plantas o familias (unidades de selección).
- Evaluación de las unidades de selección.
- Recombinación de las mejores plantas o familias (unidades de recombinación).

En este proyecto se emplearon dos unidades de selección: las plantas S_0 y las progenies o familias $S_{0:2}$. El objetivo

era mejorar las poblaciones, y se aplicaron dos estrategias:

- La primera estrategia se basa en la *selección recurrente fenotípica* masal en ambos sexos. Las plantas S_0 de cada ciclo de recurrencia son las unidades de selección y, al mismo tiempo, las unidades de recombinación. En cada ciclo se requiere, por tanto, una sola siembra de la población, pero ésta debe hacerse en el sitio donde haya presión para que se expresen los caracteres que se desea mejorar.
- La segunda estrategia requiere la *evaluación de familias*. Las plantas fértiles S_0 se seleccionan durante la época regular de cultivo que, en Colombia y en la estación LL, va de marzo a septiembre. Una parte de la semilla S_0 se guarda y la otra parte se siembra para obtener la generación $S_{0:1}$; ésta se hace avanzar, durante el período de octubre a febrero, en la estación experimental del CIAT–Palmira (EP). La semilla $S_{0:2}$ se cosecha en la EP y se siembra en la estación LL en la siguiente época de cultivo (marzo-septiembre).
  Las líneas $S_{0:2}$ son evaluadas y se comparan con tres testigos. Se emplea, generalmente, el diseño experimental de bloques aumentados propuesto por Federer en 1956 (BAF). Después de la evaluación (siguiente semestre), la semilla de las plantas S_0, que ha dado origen a las mejores famillas $S_{0:2}$, y que había sido guardada, se recombina. De este modo, cada ciclo de recurrencia se completa en cuatro cultivos (dos en la época normal de cultivo y dos en la época intermedia o de 'mitaca'), es decir, tarda 2 años.

Selección recurrente fenotípica masal en ambos sexos

Las poblaciones PCT-4, PCT-A y PCT-5 fueron sometidas a tres ciclos de selección recurrente fenotípica masal en ambos sexos respecto a dos características: resistencia a la piricularia de la hoja y resistencia al virus de la hoja blanca (VHB). La metodología empleada consistió en evaluar y seleccionar, durante todo el desarrollo de las plantas (desde la germinación hasta la floración), aquellas plantas que demostraban fenotípicamente resistencia a las dos enfermedades. La planta que presentaba alguna reacción susceptible, en cualquier etapa de su desarrollo, era eliminada del campo desde el momento en que se observaban los síntomas.

Puesto que solamente las plantas sanas lograban llegar a la cosecha, la selección incluyó los dos sexos, es decir, solamente las plantas fértiles sanas polinizaban las plantas androestériles vecinas, también sanas. El proceso de mejoramiento de poblaciones debía considerar muchos caracteres para tener mayor posibilidad de interesar a los programas nacionales; por consiguiente, se cosecharon solamente las plantas androestériles que cumplían con unos requisitos agronómicos mínimos. Además, los resultados de esta estrategia indicaron (Ospina et al., 2000) que sólo un ciclo de selección era suficiente para reducir significativamente el número de plantas enfermas en las poblaciones mejoradas del ciclo siguiente.

Teniendo en mente el desarrollo de líneas y la comparación de las estrategias de selección, en 1999 y después de tres ciclos de selección recurrente masal respecto a la resistencia al VHB, se evaluaron en la EP 107 líneas $S_{0:2}$ de las tres poblaciones. Los resultados de esa

evaluación (Cuadro 1) muestran lo siguiente:

- De esas líneas, que se originaron en las poblaciones de amplia base genética y se hallaban en proceso de mejora mediante la selección recurrente, 54.2% se mostraron resistentes al VHB.
- Estos resultados son comparables a los obtenidos por otros programas de mejoramiento que aplican métodos clásicos a las plantas autógamas.

Las líneas generadas por el proyecto se diferencian de las convencionales en su base genética más amplia. Esta afirmación se basa solamente en el número y en el origen de los progenitores involucrados en los cruces de los que provienen las poblaciones, ya que en esta etapa del trabajo no se dispone todavía de herramientas más precisas, como los marcadores moleculares que permiten comparar la base genética de los distintos materiales.

Las poblaciones que recibieron el mejoramiento poblacional y las líneas derivadas de ellas fueron puestas a disposición de los programas nacionales, para que utilicen su variabilidad genética y aprovechen el mejoramiento logrado en las dos características (resistencia a piricularia y al VHB), que son prioritarias para el cultivo del arroz en América Latina.

Durante la época de cultivo del 2001, las tres poblaciones mejoradas fueron sembradas en la estación LL, y de ellas se seleccionaron plantas S_0 para desarrollar, mediante el método del pedigrí, varias líneas mejoradas.

Selección recurrente basada en líneas $S_{0:2}$

La población PCT-4 es una población de sitio específico creada en Colombia para las sabanas de suelos ácidos (Ospina et al., 2000). Esta población fue mejorada mediante selección recurrente basada en la evaluación de la

Cuadro 1. Evaluación de la resistencia al virus de la hoja blanca (VHB) en las líneas S_2 de las poblaciones de arroz PCT-5, PCT-A y PCT-4, en la EP (CIAT-Palmira), en Colombia, 1999.

Líneas S_2	Líneas (%) con reacción al VHB (escala 1-9)		
	Resistente (1-3)	Intermedia (5)	Susceptible (7-9)
En poblaciones mejoradas	54.2	42.9	2.8
Líneas de Fedearroz[a]	59.1	30.6	10.2
Líneas del ICA[a]	51.4	4.0	44.4
Líneas del IRRI[a]	5.6	4.6	89.7
Colombia 1 (testigo resistente)	90.3	9.7	0
Blue Bonnet (testigo susceptible)	0	3.8	96.2
CICA 8 (testigo intermedio)	0	86.4	13.6

a. Fedearroz = Federación de Arroceros de Colombia; ICA = Instituto Colombiano Agropecuario; IRRI = Instituto Internacional de Investigaciones sobre el Arroz, Los Baños, Filipinas.

descendencia $S_{0:2}$; el trabajo incluía los pasos siguientes:

- **Población PCT-4 mejorada en tres ciclos de selección recurrente.** Desde 1995 y hasta la fecha, la población PCT-4 fue sometida a tres ciclos de selección recurrente para obtener la población identificada como PCT-4\SA\1\1,SA\1,SA\1 (Ospina et al., 2000).
- **Población PCT-4 mejorada en un ciclo de selección seguido de tres recombinaciones.** Para averiguar si las recombinaciones sucesivas tras una selección tenían algún efecto en la población resultante, se decidió, después del primer ciclo de selección recurrente respecto al suelo ácido (\SA), hacer lo siguiente:
  - recombinar tres veces (\SA\3) la población PCT-4;
  - sembrar en la estación LL, en el año 2000, las semillas S_0 de la población que se obtuvo (PCT-4\SA\3\1);
  - seleccionar en la EP, en el 2001, las mejores 240 plantas fértiles S_0 y hacerlas avanzar a la generación $S_{0:1}$ (semillas $S_{0:2}$);
  - sembrar en la estación LL, en el 2002, esas 240 líneas $S_{0:2}$, aplicando el diseño BAF con tres testigos.

Después de evaluadas las líneas $S_{0:2}$ de las dos poblaciones anteriores, entre las mejores de ellas (según los resultados del ensayo) se seleccionó el 30%. Estas líneas mejores fueron recombinadas empleando la semilla remanente de las plantas S_0, es decir, las semillas $S_{0:1}$. Así se completó el ciclo de selección recurrente.

Una vez obtenidas las poblaciones mejoradas empleando los dos métodos anteriores, se hizo una comparación del comportamiento de las líneas extraídas de ambas poblaciones; actualmente se está evaluando el avance genético que posiblemente se obtuvo.

Desarrollo de líneas obtenidas de poblaciones mejoradas

Las plantas que se extraen de las poblaciones manejadas mediante la selección recurrente se desarrollan como líneas segregantes. Este trabajo es parte importante de la estrategia general del proyecto, que incluye suministrar a los programas nacionales algunos materiales para que ellos seleccionen los de su interés y los terminen en las localidades.

Trabajo de selección

Consiste este trabajo en escoger plantas fértiles de todas las fuentes de variabilidad que se presenten durante las etapas del mejoramiento poblacional. Estos genotipos son el punto de partida del desarrollo de líneas promisorias, de futuras variedades o de progenitores potenciales en los programas de mejoramiento genético.

Los resultados del trabajo de los últimos 3 años se materializaron en la siembra del 2004 en la estación LL: allí se seleccionaron 553 plantas fértiles, se pusieron bajo selección 1599 líneas segregantes y se hicieron 74 selecciones masales que representan las líneas más avanzadas. Estos materiales provienen de diferentes poblaciones y generaciones, como se muestra en el Cuadro 2.

Las generaciones avanzadas representan las líneas fijas que pasaron por todo el proceso agronómico de selección y evaluación en las localidades, tanto de Colombia como de otros países. Las mejores líneas conformaron los viveros internacionales de observación (ION); éstos se distribuyeron a los socios colaboradores del proyecto, quienes iniciaron el trabajo de adaptación de los materiales.

Cuadro 2. Líneas segregantes que provienen de diferentes poblaciones de arroz de secano y que fueron evaluadas en la estación LL, en Villavicencio, Colombia, en el 2004.

Generación	Población	Selecciones (no.):	
		De plantas fértiles	Masales
S_1	CNA-7\Bo\3\1	140	
	PCT-11\0\0\2, Bo\3	204	
	PCT-4\SA\1\1, Bo\3	209	
	Total	553	
S_2	PCT-4\0\0\1>...	29	
	PCT-4\SA\7\1>...	47	
	PCT-4\SA\1\1,SA\4\1>...	46	
	PCT-4\SA\1\1,Bo\2\1>...	69	
	PCT-11\0\0\2,Bo\2\1>...	167	
	CNA-7\Bo\2\1>...	9	
	Total	367	
S_3	PCT-4\SA\1\1,SA\3\1>	175	
	PCT-4\SA\6\1>...	55	2
	PCT-4\SA\1\1,Bo\2\1>	39	
	PCT-11\0\0\2,Bo\2\1>	303	15
	CNA-7\Bo\2\1>	9	
	Total	581	17
S_4	PCT- 7		
	5\PHB\1\0,PHB\1,PHB\1,PHB\1	134	
	PCT-4\SA\1\1,SA\2\1>	238	
	PCT-4\SA\5\1>	42	
	PCT-4\SA\1\1,Bo\1\1>	46	
	PCT-11\0\0\2,Bo\1\1>	41	
	CNA-7Bo\1\1>		
	Total	508	
S_5	PCT-4\SA\4\1>	132	
	Total	132	
S_6 y S_7		6	7
		5	24
			5
			8
			6
			7
	Total	11	57

Ensayos de rendimiento

Estos ensayos se siembran, en general, en un suelo ácido que se fertiliza con los productos siguientes:

- 300 kg/ha de cal dolomítica, aplicados 30 días antes de la siembra.
- 178 kg/ha de nitrógeno, fraccionados en tres aplicaciones de 59 kg/ha cada una, así: una a los 20, otra a los 35 y otra a los 45 días después de la siembra.
- 155 kg/ha de fósforo, al momento de la siembra.
- 116 kg/ha de potasio, fraccionados en tres aplicaciones, así: la primera mitad

(58 kg/ha) al momento de la siembra, y la segunda mitad en dos porciones de 29 kg/ha cada una, a los 20 y a los 35 días después de la siembra.

No se aplica ningún control químico de enfermedades; si aparecen insectos dañinos, se aplican insecticidas químicos (sólo si es necesario hacerlo). Se emplea un diseño experimental de bloques al azar con tres repeticiones. Se evalúan las principales características agronómicas de las plantas y se cosechan todas las parcelas para calcular el rendimiento.

Ensayos y testigos

Tanto en la época de cultivo del 2000 como en la del 2001 se sembró un ensayo de rendimiento en la estación LL. En ambos ensayos, las líneas más prometedoras del proyecto se compararon con tres testigos comerciales provenientes del mejoramiento tradicional: Oryzica Sabana 6, liberada en 1992 (Leal et al., 1991), Oryzica Sabana 10, liberada en 1994, y la 'Línea 30' (CIRAD 409), liberada en el 2004. Se evaluaron 24 líneas avanzadas seleccionadas después del primer ciclo de mejoramiento mediante selección recurrente de la población PCT-4.

Resultados

Las líneas ensayadas presentaron, en los 2 años dichos, *un rendimiento de grano* que variaba entre 2000 y 3488 kg/ha. Los testigos Oryzica Sabana 10, Oryzica Sabana 6 y Línea 30 (CIRAD 409) rindieron 2000, 2633 y 2931 kg/ha, respectivamente.

El análisis de los resultados de ambos años indicó lo siguiente:

- De las tres líneas identificadas anteriormente como las más prometedoras, una confirmó su excelente comportamiento: la línea PCT-4\SA\1\1>975-M-2-M-3, que rindió 19%, 32% y 74% más que CIRAD 409, Oryzica Sabana 6 y Oryzica Sabana 10, respectivamente. Tiene la misma precocidad que el testigo más precoz, CIRAD 409.
- Del ensayo del año 2000 se concluyó que era posible romper la correlación existente entre precocidad y potencial de rendimiento.
- De las 24 líneas, 12 dieron un rendimiento igual al mejor testigo (CIRAD 409). Hay, por tanto, nuevos materiales que reemplazarían a CIRAD 409 porque tienen el mismo nivel de rendimiento y de precocidad; se ofrece así, por tanto, una posibilidad de diversificación a los productores.
- La mejor línea, PCT-4\SA\1\1>975-M-2-M-3, además de superar en rendimiento a las otras, no presenta variación anual grande en el rendimiento (a diferencia de los tres testigos), lo que indicaría que es más estable en el tiempo (Cuadro 3).

Cuadro 3. Líneas destacadas en los ensayos de rendimiento de los años 2000 y 2001 en la estación LL, en Villavicencio (Meta), Colombia.

Línea destacada	Rendimiento (kg/ha) en:			Días a floración
	2000	2001	Promedio	
PCT-4\SA\1\1* >975-M-2-M-3	3644	3333	3488	71
Línea 30 (CIRAD 409)	2332	3531	2931	71
Oryzica Sabana 6	2140	3126	2633	83
Oryzica Sabana 10	1240	2770	2000	89

* PCT-4\SA\1\1: esta nomenclatura indica una selección para suelos ácidos (SA), seguida de una recombinación, y esto corresponde a un ciclo de selección recurrente.

En el 2002, en colaboración con la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (CORPOICA), se repitió el ensayo cinco veces en sitios diferentes: dos veces en la estación LL y otras tres en distintas fincas situadas en la sabana de la Altillanura plana de los Llanos Orientales de Colombia.

Selección de líneas

El proyecto CIRAD/CIAT proporciona a los fitomejoradores de la región latinoamericana la oportunidad de seleccionar líneas en las poblaciones de arroz que están aún en proceso de mejoramiento.

En los programas nacionales

En el 2000, con la colaboración de Embrapa–Arroz e Feijão, se organizó el Primer Taller Internacional de Selección de Arroz de Secano, en Villavicencio, Colombia. En el 2002 se reunió el Segundo Taller sobre el mismo tema en Santa Cruz de la Sierra, Bolivia, organizado por el *CIAT*–Santa Cruz. El Tercer Taller tuvo lugar en Colombia, en el 2003 (CIAT, 2003).

Los objetivos de los tres eventos fueron los siguientes:

- Promover la integración de los mejoradores de arroz de secano de la región.
- Compartir la experiencia adquirida en el manejo de poblaciones segregantes y en el desarrollo de líneas fijas para el ecosistema de sabana y sus variantes.
- Seleccionar, en el campo experimental, líneas que serían introducidas más adelante en los países participantes.
- Entrenar fitomejoradores en el manejo del método de selección recurrente.

En estos talleres participaron fitomejoradores de Argentina, Bolivia, Brasil, Colombia, Cuba, Honduras, Nicaragua y Venezuela.

En el Primer Taller, por ejemplo, las actividades de selección de líneas realizadas por los investigadores participantes (Cuadro 4) fueron las siguientes:

- Se seleccionaron (según el participante) del 8% al 21% del total de las líneas.
- Colombia, Brasil y Bolivia seleccionaron más líneas que los otros países.
- La selección se basó en las siguientes características relevantes: precocidad, tipo moderno de planta (o sea, pocas macolla y arquitectura erecta), granos largos y finos (de especial interés para Brasil), resistencia a piricularia y buen potencial de rendimiento.

Eventos de este tipo, que deberían repetirse rutinariamente, son un elemento clave de la estrategia del proyecto, por las siguientes razones:

- Mantienen alta la motivación del grupo de fitomejoradores.
- Permiten a los participantes avanzar en sus conocimientos técnicos.
- Mantienen el proyecto actualizado respecto a las necesidades y solicitudes de los programas nacionales.
- Facilitan la selección de los materiales que serán introducidos en los diferentes países.

Los talleres de selección participativa antes descritos, en los que interviene un panel de fitomejoradores, son muy útiles para los participantes porque:

- Cada participante se informa bien de las actividades de sus colegas.
- Los mejoradores conocen mejor que otros profesionales la oferta que hace el proyecto de mejoramiento de arroz de secano CIRAD/CIAT.

Cuadro 4. Líneas seleccionadas (número y porcentaje) por los fitomejoradores durante el Primer Taller Internacional de Selección de Arroz de Secano reunido en la estación LL, en Villavicencio, Colombia (7-11 de agosto de 2000).

Generación	Líneas	Líneas seleccionadas (no. y %) en:					
		Bolivia	Brasil	Colombia	Cuba	Venezuela	Argentina[a]
S_1	229	14 6%	10 4.4%	14 6.1%	14 6.1%	5 2.2%	14 6.1%
Promedio: 11.8 líneas		Intensidad de selección: 5.1%					
S_2	237	0	8 3.4%	15 6.3%	0	14 5.9%	0
Promedio: 6.2 líneas		Intensidad de selección: 2.6%					
S_4	7	0	1 14.3%	3 43%	0	2 28.6%	0
Promedio: 1 línea		Intensidad de selección: 14%					
S_6	289	61 21.1%	52 18%	133 46%	47 16.2%	33 11.4%	61 21.1%
Promedio: 64.5 líneas		Intensidad de selección: 22%					
S_7	78	4 5.1%	20 25.6%	15 19.2%	3 3.4%	8 10.3%	4 5.1%
Promedio: 9 líneas		Intensidad de selección: 11.5%					
S_9	307	41 13.3%	66 21.5%	56 18.2%	38 12.3%	30 9.8%	41 13.3%
Promedio: 45.3 líneas		Intensidad de selección: 14.8%					
Total:	1147	120 10.5%	157 13.7%	236 20.6%	102 8.8%	92 8%	120 10.5%
Promedio: 137.8 líneas		Intensidad de selección: 12%					

a. Las líneas seleccionadas por Argentina son idénticas a las seleccionadas por Bolivia. Los mejoradores de Bolivia entrenaron a los de Argentina, quienes empiezan a trabajar en mejoramiento de arroz de secano.

- La selección *in situ* que hace cada participante le permite apropiarse más fácilmente del material seleccionado.
- La selección que haga el pánel de fitomejoradores es una contribución muy valiosa para la región latinoamericana, ya que el proyecto CIRAD/CIAT pertenece al ámbito regional.
- Los miembros del proyecto pueden conocer mejor el tipo de material que seleccionó cada participante y los criterios con que se consideró el material vegetal.

En el sector comercial

Colombia y Bolivia compartieron la selección de la primera variedad comercial de arroz de secano que se originó en el mejoramiento poblacional (Taboada et al., 2003). El *CIAT*–Santa Cruz y el sector arrocero privado de Bolivia lanzaron la nueva variedad comercial en el 2006.

Arroz en Bolivia

La importancia del arroz es indiscutible en Bolivia. Es un producto de la canasta familiar básica y su consumo sigue en

aumento: actualmente se acerca a 35 kg per cápita. Se emplean en Bolivia dos sistemas de producción:

- El sistema mecanizado convencional que, en el departamento de Santa Cruz, cubre un área de aproximadamente 75% del total sembrado en Bolivia, y aporta el 80% de toda la producción del país.
- El sistema de 'tumba y quema' (siembra manual), que se aplica en casi toda el área cultivada de los demás departamentos productores del país.

Todo el arroz producido se destina al mercado interno o al autoconsumo.

El crecimiento del sector arrocero boliviano está limitado por la falta de variedades más productivas para cada sistema de cultivo (secano manual y secano mecanizado). Por ello, el programa de mejoramiento genético de arroz del *CIAT*–Santa Cruz ha estado buscando nuevas variedades, adaptadas y productivas, para liberarlas a los agricultores. Estableció, por tanto, una colaboración con el proyecto de mejoramiento de poblaciones de arroz de secano CIRAD/CIAT, con sede en Colombia, y en ese trabajo colaborativo se identificó una nueva variedad adaptada tanto al sistema manual de los pequeños productores como al sistema mecanizado.

La nueva variedad, cuyo registro numérico es SR 99343, es una línea del proyecto CIRAD/CIAT proveniente del mejoramiento de poblaciones de arroz, que fue seleccionada en la estación LL, en Colombia, en el primer ciclo de recombinación de la población PCT-4.

Línea seleccionada

Se seleccionaron varias líneas segregantes por el método del pedigrí, y la línea avanzada PCT-4\0\0\1>S2-1584-4-M-5-M-6-M-M se envió a Bolivia para ser evaluada a nivel local. En el *CIAT*–Santa Cruz, de Bolivia, la línea recorrió todo el proceso de evaluación en ensayos agronómicos, y fue considerada línea promisoria bien adaptada a ambos sistemas de producción de arroz, el manual y el mecanizado.

En el Cuadro 5 se presentan sus características agronómicas. El potencial de rendimiento observado en las pruebas de eficiencia del 2003, en ambos sistemas de producción, se presenta en el Cuadro 6. Los principales descriptores de la nueva variedad y su reacción a las principales enfermedades se consignan en el Cuadro 7.

Las siguientes características de la línea benefician a los *pequeños agricultores*:

- La precocidad asociada a un buen potencial de rendimiento, porque

Cuadro 5. Características agronómicas evaluadas en el Ensayo de Adaptación Regional, en *CIAT*–Santa Cruz (Bolivia), en el verano de 2002-2003.

	Días a floración	Altura planta (cm)	Vigor (1 a 5)	Longitud grano (mm)	Peso 1000 granos (g)	Grano excelso (%)	Centro blanco (1 a 9)	Temperatura de gelatinización
Línea SR 99343	85	96	1	7.05	32.3	49.4	1.7	Alta
Testigos								
Jasayé	100	108	1	6.82	36.1	56.4	4.1	Media
Tutuma	93	104	3	6.73	26.6	47.7	1.8	Alta

Cuadro 6. Prueba de eficiencia de la línea mejorada y de siete testigos, tanto en condiciones de secano manual como de secano mecanizado, en *CIAT*–Santa Cruz (Bolivia).

	Rendimiento (kg/ha)	
	En secano manual	En secano mecanizado
Línea SR 99343	4706	4662
Testigos		
Jacuú	4861	
Jisunú	4115	
Cheruje	3948	
Jasayé	3713	
Tapeque	3102	
Tari		5380
Epagri 109		4633

Cuadro 7. Características de la nueva variedad *CIAT*–Santa Cruz (Bolivia).

Características agronómicas	Valor o calificación
Rendimiento (kg/ha, promedio)	4091
Vigor de la plántula	Vigorosa
Días a floración	90
Días a maduración	120
Altura de planta (cm)	112
Acame o vuelco	Resistente
'Exerción' de la panícula	Emergida
Longitud de la panícula (cm)	22.8
Granos/panícula	161
Maduración (%)	82.7
Desgrane	Resistencia moderada
Respecto a enfermedades	
Piricularia en la hoja	Resistente
Piricularia en la panícula	Resistente
Helmintosporiosis	Moderada resistencia
Escaldado de la hoja	Moderada resistencia
Manchado del grano	Resistente
Respecto al grano	
Pubescencia de la semilla	Ausente (semilla lisa)
Peso de 1000 granos (g)	32.2
Largo del grano limpio (mm)	7.60
Ancho de grano limpio (mm)	2.75
Relación largo/ancho	2.76
Temperatura de gelatinización	Alta
Tipo de grano	Largo
Centro blanco (1-9)	1.8
Calidad visual	Buena

favorece la rotación de cultivos en un mismo lote durante el mismo año de cultivo.
- La precocidad, porque permite comercializar la cosecha a un mejor precio en una época más temprana del año cuando no hay arroz en el mercado.

A los *productores* del sistema mecanizado los favorecen el buen tipo de planta y el grano largo, dos características preferidas por la industria arrocera.

Evaluación de la diversidad genética

La exploración de la amplia variabilidad genética presente en las poblaciones obtenidas por selección recurrente debe conducir a la liberación de variedades cuya base genética sea distinta y más amplia que la de las variedades actualmente disponibles en el mercado latinoamericano. Este resultado vendrá, como se ha indicado, de la selección de plantas mediante métodos como el de pedigrí, el masal, el masal modificado o alguna combinación de ellos, en todas las etapas del proceso de mejoramiento poblacional.

El proyecto ha desarrollado así una serie de *líneas segregantes*, de las cuales las más avanzadas se están evaluando en ensayos de rendimiento en un ecosistema apto para el cultivo de secano, en Colombia. Los resultados de estos ensayos indican, además, que es posible romper la correlación existente entre precocidad y potencial de rendimiento.

Por su parte, las herramientas de la *biotecnología* (por ejemplo, los marcadores moleculares) deberían contribuir a esta evaluación de varias maneras:

- Permitiendo evaluar la diversidad genética de las líneas desarrolladas a partir de poblaciones, comparándola con la de las variedades comerciales de arroz de secano ya existentes en América Latina.
- Averiguando la forma en que evolucionó la diversidad genética a través de los diferentes ciclos de intercruzamiento, con la intención de definir el número adecuado de recombinaciones de los alelos de los progenitores (alelos 'parentales'), tanto durante el desarrollo de las poblaciones como durante el mejoramiento de éstas por selección recurrente.
- Midiendo el efecto que puede tener el gen de androesterilidad presente en el mutante de IR36, en la frecuencia de otros alelos de la población. Este punto es de sumo interés para el proyecto.

Consideraciones finales

El proyecto CIRAD/CIAT para el mejoramiento del arroz de secano culminó una de las etapas de su estrategia inicial, es decir, desarrollar y poner a disposición de los fitomejoradores de la región latinoamericana *poblaciones de amplia base genética*. Para conocer mejor la forma en que funciona en el cultivo del arroz la metodología empleada y poder entrenar a algunos investigadores de América Latina, se trabajó con tres poblaciones empleando dos métodos de selección recurrente: el masal y el que se basa en familias. Ese germoplasma es, además, fuente de genotipos con elevada frecuencia génica para dos caracteres (resistencia a piricularia y resistencia al VHB) que fueron sometidos a presión de selección.

Se mantiene todavía la posibilidad, que fue parte del proyecto original, de generar

líneas fijas cuya base genética sea distinta de la que está presente en las variedades comerciales de la región. El propósito es ofrecer a los programas nacionales de arroz alternativas en el lanzamiento de nuevas y mejores variedades. Este material se entrega cuando se distribuyen los viveros de líneas avanzadas denominados CIAT-ION (viveros internacionales de observación manejados por el CIAT). Para desarrollar esas líneas, se aprovecharon todas las etapas del proceso de selección recurrente y se extrajeron de ellas plantas fértiles que fueron seleccionadas por el método del pedigrí.

Están en la etapa final de evaluación varias *líneas avanzadas* de la población PCT-4 que presentaron, a lo largo de los últimos 3 años, un rendimiento y un comportamiento agronómico interesantes. Una de esas líneas supera actualmente el rendimiento del mejor testigo en casi un 20%. Las líneas tienen, además de las características indicadas de interés primario para el productor, una base genética diferente.

En los *próximos años*, el proyecto continuará trabajando en cuatro direcciones:

- Crear poblaciones de selección recurrente para responder a la demanda de los programas nacionales de mejoramiento.
- Continuar el mejoramiento de las poblaciones que maneja actualmente el proyecto.
- Continuar el desarrollo y la evaluación de las líneas obtenidas de esas fuentes.
- Compartir las líneas avanzadas con los programas de mejoramiento de arroz de secano de varios países de la región latinoamericana.

Referencias bibliográficas

Altman, D.W.; Busch, R.H. 1984. Random intermating before selection in spring wheat. Crop Science 24:1085-1089.

Bajaj, R.K.; Bains, K.S.; Chahal, G.S.; Khbhra, A.S. 1990. Effect of intermating and selection in barley. Crop Improvement 17:54-58.

Châtel, M.; Guimarães, E.P. 1998. Catalogue registration to manage rice gene pools andpopulations improvement. Proyecto CIRAD/ CIAT. Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement–Department des cultures annuelles (CIRAD-CA) y Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), Cali, Colombia. 62 p.

Châtel, M.; Guimarães, E.P. 2000. Catalogue registration to manage rice gene pools and population improvement. Proyecto CIRAD/ CIAT. Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement-Department des cultures annuelles (CIRAD-CA) y Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), Cali, Colombia. 75 p.

Châtel, M.; Guimarães, E.P.; Ospina, Y.; Borrero, J. 1997a. Utilización de acervos genéticos y poblaciones de arroz de secano que segregan para un gen de androesterilidad. In: Guimarães, E.P. (ed.). Selección recurrente en arroz. Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), Cali, Colombia. p. 125-138.

Châtel, M.; Ospina, Y.; Borrero, J. 1997b. Recurrent selection breeding, using gene pools and populations with recessive male-sterile gene and conventional breeding. Informe anual del proyecto colaborativo entre el CIRAD, el CIAT y el FLAR. Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), Cali, Colombia. 65 p.

Châtel, M.; Ospina, Y.; Rodríguez, F; Lozano, V.H. 2001. Composite population breeding for upland savannas and lowland rice ecosystems. In: CIRAD/CIAT Annual Report 2001. Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), Cali, Colombia. 50 p.

CIAT (Centro Internacional de Agricultura Tropical). 2003. Memorias del Seminario–Taller Internacional de Mejoramiento de Arroz de Secano para América Latina y el Caribe. Cali, Colombia. Disponible en: http://webapp.ciat.cgiar.org/riceweb/memorias/tallersecano.html

Cuevas-Pérez, F.E.; Guimarães, E.P.; Berrío, L.E.; González, D.I. 1992. Genetic base of irrigated rice in Latin America and the Caribbean, 1971 to 1989. Crop Science 32:1054-1059.

Federer, W.T. 1956. Augmented (or hoonuiaku) designs. Hawaïan Planter's Record 55:191-208.

Guimarães, E.P. 1985. Genectic improvement of soybean from populations developed by alternative strategies of recurrent selection. Tesis (Ph.D.). Iowa State University (ISU), Ames, Iowa, EE.UU. 116 p.

Guimarães, E.P.; Châtel, M.; Ospina, Y.; Borrero, J. 1995. Mejoramiento de arroz para suelos ácidos. In: Informe anual del CIAT 1993A-1994B. Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), Cali, Colombia. 184 p.

INGER (Red Internacional para la Evaluación Genética del Arroz). 1991. Cruzamentos de arroz en América Latina. Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), Cali, Colombia. v.1, 426 p.

Jenkins, M.T. 1940. The segregation of genes affecting yield of grain in maize. Journal of the American Society of Agronomy 32:55-63.

Leal, D.M.; Sarkarung, S.; Sanz, J.I.S.; Aguirre, R.H.V.; Delgado, H.H. 1991. Oryzica Sabana 6, variedad mejorada de arroz para sistemas sostenibles de producción en suelos de sabana. Plegable de divulgación no. 238. Instituto Colombiano Agropecuario (ICA), Bogotá, Colombia. 6 p.

Meredith, W.R. Jr.; Bridge, R.R. 1971. Breakup of linkage blocks in cotton, *Gossypium hirsutum* L. Crop Science 11:695-698.

Miller, P.A.; Rawlings, J.O. 1967. Breakup of initial linkage blocks through intermating in a cotton breeding program. Crop Science 7:199-204.

Montalván, R.; Destro, D.; Silva, E.F. da; Montaño, J.C. 1998. Genetic base of Brazilian upland rice cultivars. Journal of Genetic Breeding 52:203-209.

Ospina, Y.; Châtel, M.; Guimarães, E.P. 2000. Mejoramiento poblacional del arroz de sabanas. In: Guimarães, E.P. (ed.). Avances en el mejoramiento poblacional en arroz. Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), Cali, Colombia. p. 241-254.

Piper, T.E.; Fehr, W.R. 1987. Yield improvement in a soybean population by utilizing alternative strategies of recurrent selection. Crop Science 27:172-178.

Polanco, R.P.; Châtel, M.; Guimarães, E.P. 2000. Mejoramiento poblacional del arroz en Cuba: Situación actual y perspectivas. In: Guimarães, E.P. (ed.). Avances en el mejoramiento poblacional en arroz. Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), Cali, Colombia. p. 131-144.

Rangel, P.H.N.; Guimarães, E.P.; Neves, P. de C.F. 1996. Base genética das cultivares de arroz (*Oryza sativa* L.) irrigado do Brasil. Pesquisa Agropecuária Brasileira 31(5): 349-357.

Singh, R.J.; Ikehashi, H.I. 1981. Monogenic male-sterility in rice: Introduction, identification and inheritance. Crop Science 21:286-289.

Taboada, R.; Guzmán, R.; Viruez, J.; Callaú, V.H.; Châtel, M.; Ospina, Y.; Rodríguez, F.; Lozano, V.H. 2003. Improved rice germplasm for Latin America and the Caribbean. CIAT–Santa Cruz (Bolivia) y Proyecto CIRAD/CIAT. In: Annual Report 2003. Documento del CIAT. Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), Cali, Colombia. 45 p.

Taillebois, J.; Guimarães, E.P. 1989. CNA-IRAT 5 upland rice population. International Rice Research Newsletter 14(3):8.

Tao, D.; Hu, F.; Yang, Y.; Xu, P.; Li, J. 2000. Yunnan, China: Mejoramiento poblacional de arroz para rendimiento de granos, resistencia a piricularia, tolerancia del frío y calidad del grano. In: Guimarães, E.P. (ed.). Avances en el mejoramiento poblacional en arroz. Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), Cali, Colombia. p. 145-154.

Capítulo 13

Las especies silvestres en el mejoramiento varietal del arroz

César P. Martínez
Jaime Borrero
Silvio J. Carabalí
Fernando Correa
Myriam Cristina Duque

Contenido

	Página
Resumen	225
Abstract	226
Introducción	226
Aumento de la diversidad genética del arroz	227
Identificación de germoplasma	229
Que tolere enfermedades	229
Que tolere factores abióticos	229
Evaluación de líneas derivadas de cruces interespecíficos	230
Potencial de rendimiento y buen comportamiento	230
Efecto de la especie silvestre en la calidad culinaria y nutricional del arroz	234
Valor nutricional del arroz silvestre	235
Variabilidad distribuida por los viveros CIAT-ION	237
Retos y oportunidades futuras	237
Referencias bibliográficas	239

Resumen

En 1994, el Proyecto de Arroz del CIAT inició un programa de pre-mejoramiento en el que se tomaron las especies *Oryza rufipogon*, *O. barthii* y *O. glaberrima* (recientemente se introdujo *O. latifolia*) para cruzarlas con variedades comerciales de arroz de riego y de secano, mediante un esquema de retrocruzamientos que incorpora genes de interés de las especies silvestres en el arroz cultivado. Los resultados subrayan la importancia de las especies silvestres en el mejoramiento de los cultivares de arroz, tanto por el método convencional como mediante la selección asistida por marcadores. El grado de polimorfismo encontrado en los cruces de especies silvestres con *O. sativa* fue mucho mayor (90%) que el encontrado en los cruces de cultivares índica x cultivares japónica (46%). En conclusión, el uso del nuevo germoplasma exótico en el mejoramiento del arroz puede tener un impacto sustancial en la productividad del arroz, en su resistencia a varias limitantes bióticas y abióticas, y en su calidad nutricional y agroindustrial. La variabilidad genética así generada está a disposición de los programas nacionales de arroz de América Latina en los viveros CIAT-ION. Los programas de Bolivia,

Panamá y Nicaragua, por ejemplo, identificaron algunas líneas derivadas de cruces entre *O. sativa* x *O. glaberrima* y entre *O. sativa* x *O. rufipogon*, con buen potencial de rendimiento, tolerancia a las principales plagas y enfermedades, producción de grano de buena calidad y buena capacidad de adaptación. Algunas de estas líneas fueron liberadas como variedades comerciales en 2009 y 2010.

Abstract

Wild species in varietal improvement of rice

In 1994 the CIAT Rice Project launched a pre-breeding program that crossed the species *Oryza rufipogon*, *O. barthii*, and *O. glaberrima* (*O. latifolia* was recently introduced) with commercial irrigated and upland rice varieties, using a backcrossing scheme that incorporates genes of interest of wild species into cultivated rice. The results emphasize the importance of wild species in improving rice cultivars using both conventional methods and marker-assisted selection. The degree of polymorphism found in crosses of wild species with *O. sativa* was much higher (90%) than that found in crosses of indica x japonica cultivars (46%). In conclusion, the use of new exotic germplasm in rice improvement can have a substantial impact on rice productivity, its resistance to several biotic and abiotic stresses, and its nutritional and agroindustrial quality. National rice programs of Latin America can access the genetic variability thus generated in the CIAT-ION nurseries. Programs in Bolivia, Panama, and Nicaragua, for example, identified several lines derived from crosses between *O. sativa* x *O. glaberrima* and between *O. sativa* x *O. rufipogon* that show good yield potential, tolerance to major pests and diseases, good-quality grain, and good adaptability. Some of these lines were launched as commercial varieties in 2009 and 2010.

Introducción

La variabilidad genética es un requisito esencial para avanzar en un programa de mejoramiento. Se emplean, generalmente, diversas fuentes de recursos genéticos para desarrollar variedades superiores que respondan a las exigencias de los usuarios. Los cruzamientos hechos con progenitores superiores bien caracterizados tienen una alta probabilidad de generar los productos esperados; desafortunadamente, no son muchos los progenitores superiores disponibles. ¿Qué factores o eventos *reducen la variabilidad* genética del arroz? Se pueden mencionar tres principales:

- El *uso continuo* de los pocos progenitores superiores trae consigo el reciclaje de un mismo conjunto de genes (y una reducción en variabilidad).
- Los cultivares nativos o tradicionales provienen de selecciones realizadas por los *cultivadores primitivos* a partir de especies silvestres, y este proceso redujo intrínsecamente la variabilidad genética.
- El *mejoramiento moderno*, que es intensivo, redujo aún más esa variabilidad, lo que se manifiesta, en las variedades modernas de arroz, en su vulnerabilidad al estrés biótico y al abiótico y en el llamado 'techo de rendimiento' en la productividad del cereal.

Se cree que los programas de *mejoramiento genético* del arroz utilizan alrededor del 25% de la variabilidad genética de la especie. De otro lado, el uso de progenitores no mejorados, como las especies silvestres, es difícil y representa un trabajo lento y costoso para los programas nacionales; es una tarea propia de los programas de

mejoramiento de los centros internacionales de investigación agrícola, porque tienen objetivos estratégicos y más recursos.

Es urgente aumentar la producción de arroz de manera sostenible para poder satisfacer la demanda de este cereal en la región latinoamericana. Numerosos estudios indican que el *potencial de rendimiento* del arroz de riego en América Latina ha alcanzado un techo (CIAT, 1992; Peng et al., 1994; Fedearroz, 1993); por otra parte, en esa región (particularmente en Colombia), el mejoramiento del arroz de riego ha dependido de un núcleo genético compuesto por 12 cultivares (Cuevas-Pérez et al., 1992). Por fortuna, la variación genética del género y la especie es abundante en la naturaleza y se preserva parcialmente en los bancos de germoplasma. Cuatro especies silvestres de arroz se han encontrado en América Latina, las cuales están en peligro de extinción, y pocas accesiones se encuentran en los bancos de germoplasma; es necesario, por tanto, recolectarlas, caracterizarlas y utilizarlas en programas de mejoramiento antes de que desaparezcan.

Se han propuesto diversas *estrategias* para incrementar el rendimiento del arroz: modificar el tipo de planta (NTP), propuesta por Khush (1990); desarrollar híbridos como los obtenidos en China (Yuan y Virmani, 1988); emplear métodos de mejoramiento poblacional (Fujimaki, 1979); hacer mejoramiento molecular o selección asistida por marcadores (Zhang, 2007); y utilizar especies silvestres (Tanskley y Nelson, 1996; Moncada et al., 2001). Esta última opción presenta tres grandes dificultades:

- Identificar genes asociados con el rendimiento y la calidad del grano en el germoplasma silvestre.
- Romper el ligamiento negativo estrecho que existe entre caracteres deseables e indeseables.
- Solucionar el problema de esterilidad que normalmente se presenta en los cruzamientos interespecíficos, especialmente entre especies pertenecientes a distintos genomas.

El género *Oryza* contiene 20 especies silvestres y dos especies cultivadas (*O. sativa* y *O. glaberrima*). Las *especies silvestres* son una fuente adicional de genes para mejorar en el arroz el potencial de rendimiento, la calidad del grano y la tolerancia del estrés debido a factores bióticos y abióticos (Xiao et al., 1998; De Vicente y Tanskley, 1993).

Aumento de la diversidad genética del arroz

La diversidad genética del arroz cultivado se incrementa desarrollando poblaciones interespecíficas resultantes de cruzamientos con el germoplasma exótico (especies silvestres, variedades tradicionales y criollas), mediante la combinación de técnicas moleculares con métodos convencionales de mejoramiento. Se emplean, por tanto, técnicas de biotecnología como el cultivo de anteras, el rescate de embriones y los marcadores moleculares, de un lado; del otro, los métodos convencionales de mejoramiento, como la selección masal modificada, la selección recurrente, el pedigrí, el retrocruzamiento y el avance generacional rápido. Con esta estrategia se obtendrán líneas mejoradas de mayor potencial de rendimiento que las actuales, de buena calidad de grano y tolerantes del estrés debido a factores bióticos y abióticos. Es muy difícil que, partiendo del cruzamiento entre una especie silvestre y una línea élite o una variedad mejorada, se obtenga una línea mejorada superior que posea todas las características deseables necesarias para ser liberada como una nueva variedad. Por consiguiente, es

necesario hacer cruzamientos adicionales para corregir los defectos observados en las líneas interespecíficas.

El Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT) inició el trabajo de mejoramiento con especies silvestres en 1994, cuando introdujo las especies *O. rufipogon*, *O. barthii* y *O. glaberrima* (pertenecientes al genoma AA) y las cruzó con variedades del sistema con riego (Bg90-2, Morelos A88, Oryzica 3, Oryzica Llanos 5, Jefferson y Lemont) y del sistema de secano (Oryzica Sabana 6, Oryzica Turipana 7, Progresso y Caiapo). El objetivo era generar poblaciones mediante retrocruzamientos (2-3) hacia la variedad mejorada, evaluarlas y seleccionar luego en las estaciones experimentales de CIAT-Palmira y de Santa Rosa, en Villavicencio. Posteriormente se incluyó en el proyecto *O. latifolia* (tetraploide con genoma CCDD) y en la actualidad se están utilizando *O. glumaepatula* y *O. meridionalis*. Estudios recientes desarrollados por Orjuela (2006) en la Unidad de Biotecnología del CIAT indican que el grado de polimorfismo encontrado en cruces entre del tipo especie silvestre x *O. sativa* fue mucho mayor (90%) que el encontrado entre cruces del tipo índica x japónica (46%).

El esquema de retrocruzamiento que se emplea incorpora los genes de interés presentes en las especies silvestres (*O. rufipogon*, *O. glaberrima* y *O. barthii*) en variedades comerciales o en líneas élite mediante dos o tres retrocruces hacia el padre mejorado. Las etapas del esquema son las siguientes:

- Seleccionar cuidadosamente la variedad mejorada o la línea élite que servirá de padre recurrente y de madre en el cruce simple. La especie silvestre seleccionada debe ser portadora del carácter de interés que se quiere 'introgresar' en la nueva población. Las plantas F_1 presentarán, generalmente, esterilidad alta y se usarán como madre en los siguientes retrocruces. En los cruces con *O. glaberrima*, *O. barthii*, *O. latifolia* y *O. meridionalis* es necesario hacer de dos a cuatro retrocruces con el fin de recuperar progenies de buena fertilidad. El grado de esterilidad de un cruzamiento y las características agronómicas deseables son los criterios que se emplean para seleccionar plantas individuales o para hacer, en la F_1, un masal modificado del segundo o del tercer retrocruzamiento.
- Las familias F_2 que se obtengan se evalúan en condiciones no favorables, por ejemplo, con alta incidencia de enfermedades, en secano, en suelos de baja fertilidad. Se da más énfasis a las mejores familias y se observa con atención la presencia de segregación transgresiva, es decir, de individuos que presentan caracteres ausentes en los padres.
- La generación F_3 se evalúa en surcos para pedigrí, en condiciones climáticas y de suelo favorables. Se sugiere alternar los ciclos de selección: uno en condiciones favorables y otro en condiciones desfavorables.
- La estación experimental Santa Rosa, manejada por el CIAT, es un sitio ideal para este trabajo. Las condiciones naturales reinantes —como humedad y temperatura altas, las varias horas de rocío diarias, los suelos ácidos de baja fertilidad— favorecen la alta incidencia natural de enfermedades graves como la piricularia, y de otras secundarias como las causadas por *Helminthosporium* sp., *Rhinchosporium* sp. y manchado del grano, lo que facilita una apropiada caracterización y selección de las poblaciones.
- La estación CIAT-Palmira, en cambio, está en una localidad de baja presión de enfermedades, pero en ella se facilita la selección por tipo de planta, buen vigor y potencial de rendimiento.

- La evaluación y la selección alternas en ecosistemas contrastantes (Santa Rosa y Palmira, por ejemplo) tiene como objetivo facilitar la identificación de las líneas que tengan buena adaptación general.
- Las mejores líneas, identificadas como tales mediante este proceso de selección alterna, se incluyen en viveros (los viveros internacionales de observación, CIAT-ION), los cuales se ponen a disposición de los programas nacionales de arroz para que las evalúen en diferentes condiciones. Pueden ser usadas como progenitores en programas de mejoramiento o como variedades potenciales.

Identificación de germoplasma

Que tolere enfermedades

- Del cruzamiento entre Oryzica 3 y *O. rufipogon* se seleccionaron líneas avanzadas que tenían buen tipo de planta y vigor, tallos fuertes, y grano largo y delgado de excelente calidad. Se hicieron ensayos de campo en Saldaña (Tolima) y en condiciones de invernadero en CIAT-Palmira, y se halló que las líneas son tolerantes de la acción de *Rhizoctonia* sp., tolerancia derivada, posiblemente, del progenitor silvestre. Algunas de esas líneas son también tolerantes de las enfermedades causadas por *Sarocladium oryzae* y por *Bipolaris oryzae*. Estas dos enfermedades, que antes eran de menor importancia, ahora causan pérdidas de rendimiento en varias zonas arroceras de Colombia y de América Latina.
- Se han identificado líneas promisorias en esa población de líneas avanzadas, gracias al refinamiento de las técnicas de campo y de invernadero, y a la colaboración científica de Fedearroz, en Colombia. Esas líneas se evalúan actualmente respecto a sus características agronómicas en varios sitios de Tolima, Colombia (Cuadro 1), y en otros países, como en Bolivia.
- El hongo *Polymyxa graminis* es el transmisor de la enfermedad viral llamada entorchamiento, que fue reportada por primera vez en Costa de Marfil en 1977, luego en Colombia en 1991 y posteriormente en Panamá y en Brasil. Aunque todas las variedades comerciales de arroz son susceptibles, se halló un nivel alto de tolerancia en *O. glaberrima*. Gutiérrez et al. (2010) encontraron en el cromosoma 11 un QTL asociado con la tolerancia al entorchamiento. Los genes de resistencia al entorchamiento presentes en esta especie silvestre fueron transferidos, mediante un programa de retrocruzamientos, a las variedades Caiapo y Bg90-2. Las evaluaciones hechas, tanto en condiciones de campo como de invernadero, en estrecha colaboración con los investigadores de Fedearroz, han permitido identificar y seleccionar líneas avanzadas que toleran el entorchamiento (Cuadro 2).
- Los cruzamientos con la variedad silvestre *O. barthii* dieron progenies con bajo potencial de rendimiento y con esterilidad alta. Sin embargo, tres retrocruces hacia Lemont produjeron líneas avanzadas muy fértiles, de panículas largas, de grano largo y delgado (grano pesado), precoces, tolerantes de la piricularia, del escaldado, del ataque de *Helminthosporium* y del manchado del grano, y con excelente calidad de cocción y de molinería. Aunque son muy susceptibles al ataque del insecto *Tagosodes oryzicolus* y al virus de la hoja blanca, se han hecho nuevos cruzamientos para corregir estas limitantes.

Que tolere factores abióticos

Líneas segregantes y líneas haploides dobles derivadas de las poblaciones

Cuadro 1. Tolerancia de cuatro enfermedades observada en las líneas avanzadas del cruce Oryzica 3 x *O. rufipogon*, en condiciones de campo, en Saldaña (Tolima), en Colombia.

Selección por pedigrí	Tolerante (escala 1-9) de enfermedad causada por:			
	Rhizoctonia[a]	*Sarocladium*[a]	*Helminthosporium*[a]	*Helminthosporium*[b]
CT14524-2-M-2-M	3	3	5	15
CT14524-2-M-3-3	3	3	5	15
CT14529-12-M-1-2	3	1-5	5	0
CT14529-12-M-2-3	3	5	7	30
CT14529-18-M-3-M*	3	3-5	3	0
CT14529-18-M-4-M*	3	1-5	3	20
CT14534-12-M-1-3	5	3	7	0
CT14534-12-M-3-4*	3	1	1	0
CT14534-12-M-4-1	5	3	1	0
CT14537-8-M-4-M	3	1	1	0
CT14537-9-M-4-1*	3	5	3	0
CT14537-21-M-6-3	3	3	3	0
CT14539-31-M-1-1*	3	5	3	0
CT14539-34-M-4-M-2*	3	3	3	0
Oryzica 3 (Testigo)	7-9	5-7	1-3	0-20
CT14524-3-M-2-2	7-9	7	5-7	40

a. Escala 1-9, del Sistema de Evaluación Estándar del IRRI: 1 = resistente, 9 = susceptible.
b. Porcentaje de infección del cuello de la panícula.
* Líneas seleccionadas por Fedearroz.

obtenidas de los cruces Caiapo x *O. glaberrima* y Progresso x *O. barthii* fueron evaluadas en condiciones de suelos ácidos y de secano en la Estación Experimental La Libertad (Meta), en Colombia, en colaboración con el CIRAD y con CORPOICA. Se seleccionaron algunas líneas promisorias de esos ensayos para hacerlas progenitores en el programa de mejoramiento de arroz de secano del CIAT que busca el desarrollo de germoplasma adaptado a las condiciones de los suelos ácidos e infértiles.

Se hizo luego un análisis molecular con marcadores microsatélites en 312 líneas haploides dobles derivadas, por cultivo de anteras, del cruce Caiapo x *O. glaberrima.* Partiendo de esta información molecular, se escogieron inicialmente 110 líneas, las cuales se redujeron más tarde, con base en los nuevos retrocruzamientos dirigidos, a 64 líneas (Gutiérrez et al., 2010); estas líneas representan el 87.6% del genoma de Caipo y el 7.6 % del de *O. glaberrima.* Cada línea contiene un segmento particular del genoma silvestre, que servirá para localizar y ubicar en un mapa (mapear) genes específicos provenientes de *O. glaberrima* que se asocien con características agronómicas de interés. Estas líneas, conocidas como 'líneas de sustitución de segmentos cromosómicos' (CSSL, en inglés) facilitarán, en general, el mejoramiento varietal del arroz (Gutiérrez et al., 2010).

Evaluación de líneas derivadas de cruces interespecíficos

Potencial de rendimiento y buen comportamiento

Entre 1999 y 2003 se hicieron, en CIAT-Palmira y en otras localidades, ensayos de

Cuadro 2. Tolerancia de la virosis denominada entorchamiento en las líneas avanzadas del cruce Bg90-2 x *O. glaberrima*, bajo condiciones de invernadero.

Selección por pedigrí	Presencia en plantas (%) del síntoma			Plantas (no.)	
	Hojas entorchadas	Bandas o amarillamiento	Enanismo	Muertas	Sanas[a]
CT15150-M-21-8-2	25	40	38	15	39
CT15150-M-50-2-1	0	0	2	0	97
CT15150-M-50-2-5	0	0	0	0	100
CT15159-M-79-9-3	0	0	0	0	100
CT15150-M-79-11-2	5	5	8	3	89
CT15150-M-79-11-4	0	0	0	0	100
CT15150-M-92-3-5	23	35	40	0	60
CT15150-M-106-5-2	0	0	0	3	97
CT15150-M-124-1-2	2	2	2	0	97
CT15150-M-129-1-2	0	0	0	0	95
CT15150-M-129-1-3	0	2	5	0	95
CT15150-M-149-1-1	2	2	2	0	97
CT15150-M-181-4-1	0	0	2	0	97
CT15150-M-190-2-1	2	5	2	8	87
CT15150-M-242-3-1	0	0	0	0	100
CT16053A-6-1-1	45	55	55	10	32
Oryza glaberrima	0	0	0	0	100
Oryzica 3	55	73	73	8	17
Bg90-2	42	57	55	8	30
Coprosem 1	20	30	35	2	62

a. Porcentaje de sanas respecto a *O. glaberrima* (100% sanas).

rendimiento con líneas derivadas de cruces interespecíficos.

- **Cruces con *O. barthii*.** Se hicieron análisis estadísticos en las poblaciones derivadas de los cruces Bg90-2 x *O. barthii*, Lemont x *O. barthii*, y Oryzica Llanos 5 x *O. barthii*, y no se detectaron diferencias significativas en rendimiento entre las líneas de esas poblaciones y los padres recurrentes Bg90-2, Lemont y Oryzica Llanos 5. Esto sugiere que quizás *O. barthii* no posea genes asociados con rendimiento que sean diferentes de los ya existentes en los padres recurrentes.
  En estas poblaciones se presentó una esterilidad muy alta, que pudo incidir en la pérdida de progenies interesantes; esto dio lugar a poblaciones muy sesgadas, que no eran representativas de la variabilidad genética en cuanto al rendimiento, ni apropiadas para hacer inferencias sobre regiones del cromosoma asociadas con el potencial de rendimiento. No obstante, se identificaron y seleccionaron líneas avanzadas de características sobresalientes respecto a vigor y fortaleza de los tallos (como Bg90-2 x *O. barthii*), y líneas de calidad de cocción y calidad industrial excelentes, con buena precocidad y de panículas largas (como Lemont x *O. barthii*).
- **Cruces con *O. glaberrima*.** En los cruzamientos con *O. glaberrima* se presentó también un alto grado de esterilidad, lo que dificultó mucho la

tarea de desarrollar una población con un número adecuado de líneas, que permitiera hacer una evaluación agronómica confiable de la contribución de esta especie silvestre al potencial de rendimiento del arroz. No obstante, mediante el cultivo de anteras fue posible desarrollar líneas haploides dobles a partir del cruce Caiapo x *O. glaberrima*, y se hizo luego su caracterización molecular y agronómica. Si bien algunas líneas superaron en rendimiento a Caiapo, la diferencia no fue significativa. El análisis molecular sugiere que algunas regiones del genoma de *O. glaberrima* están asociadas positivamente con componentes del rendimiento y con la calidad del grano del arroz (Aluko et al., 2004).

- **Cruces con *O. rufipogon*.** Del cruce Bg90-2 x *O. rufipogon* se obtuvieron progenies que fueron ensayadas en la estación CIAT–Palmira para evaluar su potencial de rendimiento. El rendimiento observado en la generación F_2 se mantuvo a través de la selección fenotípica practicada en varias generaciones. Si bien no hubo diferencias significativas en rendimiento entre las progenies y el progenitor recurrente, varias rindieron de 10% a 20% más que la variedad Bg90-2.
  Oryza rufipogon es considerada una fuente potencial de variabilidad genética para el mejoramiento del arroz y una fuente de nuevos alelos para mejorar el rendimiento, la calidad del grano y la resistencia a factores bióticos y abióticos en las variedades comerciales (Moncada et al., 2001; Brar et al., 2002; Xiao et al., 1998; Tanksley y McCouch, 1997; Thomson et al., 2003). Ahora bien, en esos trabajos se evaluaron poblaciones segregantes tempranas (F_2BC_2) en uno o dos sitios. Por otra parte, la interacción genotipo por ambiente (G x A) puede inflar el cálculo de la varianza genética, lo que resulta en una sobreestimación de las ganancias genéticas esperadas con la selección hecha (o sea, que las ganancias reales son inferiores a las previstas). La interacción G x A determina, casi siempre, que los mejores genotipos en una localidad no sean los mejores en otras localidades.
- Se estudió, por tanto, la interacción G x A y el comportamiento de 25 líneas avanzadas F_8 derivadas de la generación F_2 del segundo retrocruzamiento entre Bg90-2 y *O. rufipogon*, y se hicieron ensayos de campo con repeticiones en siete localidades de Colombia (Cuadro 3), bajo la supervisión directa de Fedearroz, de la Universidad del Tolima, en Colombia, y de algunas empresas productoras de semilla. Estos ensayos se ejecutaron del modo siguiente:

  – Se aplicó en las siembras un diseño experimental de bloques completamente al azar, con tres repeticiones. Se establecieron los lotes por trasplante en CIAT-Palmira y en los otros sitios por siembra directa, bien sea en surcos o bien a voleo en el sistema con riego.
  – En cada sitio se aplicaron las prácticas agronómicas recomendadas en la localidad. Se sembraron dos testigos: el progenitor Bg90-2 y la variedad comercial que se cultivaba comúnmente en la localidad.
  – Se tomaron datos de las principales características agronómicas de las plantas, entre ellas el rendimiento en grano.
  – Un análisis de varianza combinado a través de ambientes permitió determinar la magnitud de la contribución de la interacción (G x A) al modelo: el

Cuadro 3. Rendimiento promedio (kg/ha) de las líneas F_8 derivadas del cruce Bg90-2 x *O. rufipogon*, evaluadas en siete localidades de Colombia, y el promedio de todas las localidades.

Selección por pedigrí	Rendimiento (kg/ha) en la localidad							
	El Aceituno	Armero	CIAT	Jamundí	Montería	Saldaña	Villavicencio	Promedio global
01. CT13941-11-M-25-1-M-M	11.192	4.825	5.903	7.470	11.180	6.534	6.542	7.664
02. CT13941-11-M-25-4-M-M	10.552	5.121	5.153	7.796	9.819	7.100	5.625	7.309
03. CT13941-11-M-25-5-M-M	11.523	5.132	5.954	6.830	10.997	7.534	6.597	7.795
07. CT13941-27-M-19-1-M-M	10.292	4.191	4.895	6.891	9.274	5.923	4.917	6.626
08. CT13946-26-M-5-3-M-M	11.693	4.949	5.457	5.326	9.939	7.898	6.069	7.434
09. CT13946-26-M-5-6-M-M	11.385	4.527	4.382	7.593	10.498	6.422	5.444	7.179
10. CT13956-29-M-14-1-M-M	10.922	4.196	5.480	6.977	10.409	5.772	5.972	7.104
11. CT13956-29-M-25-7-M-M	10.695	3.314	4.623	4.360	10.348	5.928	5.514	6.397
12. CT13958-12-M-1-7-M-M	12.199	5.281	4.190	4.600	9.567	7.959	5.875	7.096
13. CT13958-13-M-17-5-M-M	11.285	5.041	4.982	7.066	11.923	7.660	6.069	7.718
14. CT13958-13-M-2-1-M-M	11.164	4.623	5.485	4.345	9.845	6.627	4.653	6.794
15. CT13958-13-M-2-3-M-M	11.366	3.943	5.808	6.789	10.911	6.408	4.410	7.091
16. CT13958-13-M-2-4-M-M	11.345	3.656	5.552	6.017	9.660	6.247	4.056	6.648
17. CT13958-13-M-7-5-M-M	11.944	4.782	5.261	4.923	10.037	7.733	5.139	7.227
18. CT13958-13-M-26-4-M-M	11.328	3.496	4.879	5.333	9.735	6.539	4.896	6.601
19. CT13958-13-M-26-5-M-M	11.504	4.917	5.457	6.210	8.904	6.794	4.403	6.884
20. CT13958-13-M-33-1-M-M	11.955	5.422	4.938	5.348	8.816	6.269	5.278	6.861
21. CT13956-29-M-29-2-M-M	11.570	3.871	5.587	5.925	9.500	7.256	5.521	7.088
22. CT13956-29-M-8-3-M-M	10.962	5.309	3.907	5.326	10.198	7.352	5.389	7.088
23. CT13959-3-M-10-4-M-M	11.344	5.649	3.886	5.533	9.098	7.252	5.028	6.827
24. CT13959-3-M-10-5-M-M	12.200	4.657	5.040	5.326	9.358	7.988	5.035	7.086
25. CT13976-7-M-14-1-M-M	11.128	4.584	4.807	4.680	8.754	7.595	4.479	6.670
26. Bg90-2	10.757	3.785	4.902	5.686	9.435	7.837	4.340	6.677
27. Fedearroz 50	10.466	6.469	5.372	8.621	9.953	7.811	5.000	7.670
Otros testigos locales	10.235	4.322	2.927	6.504	8.212	6.144	5.042	6.426
GLOBAL	11.240	4.642	4.993	6.155	9.792	6.962	5.252	7.032

análisis AMMI (additive main effects and multiplicative interaction). Este análisis ayuda a representar los resultados en un plano, de manera que puedan detectarse las adaptaciones específicas; analiza además los efectos principales aditivos de los genotipos y de los ambientes; separa, finalmente, la variabilidad debida a G x A en componentes principales (CP), mostrando con claridad los genotipos y ambientes que mas contribuyen a la interacción.

- El modelo AMMI identificó diferencias altamente significativas de los efectos de A, de G y de la interacción G x A. El análisis estadístico por localidad indicó que varios genotipos interespecíficos superaron estadísticamente en rendimiento a su progenitor Bg90-2 en El Aceituno y en Jamundí, aunque en los demás ambientes esas diferencias no fueron significativas.
- Se emplearon la metodología de Eberhart y Russell (1966) para identificar los genotipos más estables (Cuadro 4) y el índice de superioridad (IS) de Lin & Bins (1988); este último indica el grado de superioridad de los genotipos a través de las localidades.
- Se hizo además el análisis molecular (Martínez et al., 2003) de las líneas BC2F8, el cual reveló que todas las progenies tenían introgresiones derivadas de *O. rufipogon* (entre 2 y 18 por progenie). Éste sugiere que segmentos pequeños derivados de *O. rufipogon* fueron introgresados a las progenies y podrían estar asociados con efectos positivos observados en ellas como el rendimiento y adaptación.
- Algunas líneas interespecíficas superaron a Bg90-2, a los testigos locales y a Fedearroz 50 en algunos ambientes.
- Estas líneas no presentaron diferencias estadísticas en estabilidad, y pueden considerarse, por tanto, como materiales estables.
- El modelo metodológico AMMI ayudó a identificar líneas especialmente adaptadas a cada ambiente.
- Estos resultados destacan la importancia de los cruzamientos interespecíficos en la generación de una amplia variabilidad genética.

Efecto de la especie silvestre en la calidad culinaria y nutricional del arroz

Aunque se ha incrementado la producción de alimentos en el mundo (especialmente en algunas regiones), se ha prestado poca atención al mejoramiento de la calidad nutricional de los cultivos de grano, uno de ellos el arroz. Los estudios realizados en el Instituto Internacional de Investigaciones sobre el Arroz (IRRI) y en la Asociación para el Desarrollo del Arroz en África Occidental (WARDA) han encontrado variación genética en el contenido de micronutrientes (hierro [Fe] y zinc [Zn], principalmente) del grano de arroz. Además, el cruzamiento de variedades tradicionales con especies silvestres ha producido líneas cuyo valor nutritivo es mayor que el de sus progenitores. Para estudiar esta oportunidad de mejoramiento se hicieron los siguientes trabajos preliminares en el CIAT:

- Se cosechó semilla de las líneas avanzadas CT14938-30-5-M-3 y CT14938-36-1-M-1. Estas líneas provenían del cruzamiento entre la variedad mejorada Lemont y la silvestre O. *barthii*.

Cuadro 4. Índice de estabilidad de Eberhart y Russell para los genotipos interespecíficos derivados del cruce Bg90-2 x *O. rufipogon* y evaluados en siete ambientes en Colombia, en el 2001.

Línea no.	Línea	Coeficiente de regresión	Error estándar	Prueba t H_o: $ß_i$=1	Promedio	Desviaciones S_{di}^2
1	CT13941-11-M-25-1-M-M	0.950	0.129	-0.39	7.664	0.242
2	CT13941-11-M-25-4-M-M	0.838	0.099	-1.64	7.309	-0.025
3	CT13941-11-M-25-5-M-M	0.962	0.066	-0.58	7.795	-0.233
7	CT13941-27-M-19-1-M-M	0.893	0.092	-1.16	5.554	-0.073
8	CT13946-26-M-5-3-M-M	0.997	0.102	-0.03	5.980	-0.002
9	CT13946-26-M-5-6-M-M	1.065	0.122	0.53	6.462	0.180
10	CT13956-29-M-14-1-M-M	0.963	0.132	-0.28	6.626	0.276
11	CT13956-29-M-25-7-M-M	1.108	0.140	0.77	7.434	0.360
12	CT13958-12-M-1-7-M-M	1.095	0.166	0.57	7.179	0.678**
13	CT13958-13-M-17-5-M-M	1.076	0.122	0.62	7.104	0.176
14	CT13958-13-M-2-1-M-M	1.038	0.128	0.30	6.397	0.233
15	CT13958-13-M-2-3-M-M	1.118	0.129	0.91	7.096	0.243
16	CT13958-13-M-2-4-M-M	1.090	0.103	0.87	7.718	0.007
17	CT13958-13-M-7-5-M-M	1.102	0.108	0.94	6.794	0.050
18	CT13958-13-M-26-4-M-M	1.115	0.058	1.98	7.091	-0.273
19	CT13958-13-M-26-5-M-M	0.962	0.094	-0.40	6.648	-0.057
20	CT13958-13-M-33-1-M-M	0.981	0.125	-0.15	7.227	0.204
21	CT13956-29-M-29-2-M-M	1.024	0.082	0.29	6.601	-0.140
22	CT13956-29-M-8-3-M-M	1.026	0.116	0.22	6.884	0.125
23	CT13959-3-M-10-4-M-M	0.981	0.124	-0.15	6.861	0.199
24	CT13959-3-M-10-5-M-M	1.096	0.113	0.85	7.088	0.093
25	CT13976-7-M-14-1-M-M	0.993	0.124	-0.06	7.088	0.196
26	Bg90-2	1.029	0.105	0.28	6.827	0.023
27	Fedearroz 50	0.755	0.168	-1.46	7.086	0.699**
	Otros testigos locales	0.907	0.140	-0.66	6.670	0.357

- Se tomaron muestras de estos granos molinados y se evaluó su calidad en un laboratorio.
- Se repartieron luego muestras de semilla de 2 kg entre 64 personas seleccionadas al azar, quienes harían una evaluación culinaria de ese arroz. Cocinaban el arroz, lo comparaban con el que consumían habitualmente, y respondían una encuesta sobre la apariencia, la textura, el color y el sabor de la muestra.

Los datos del laboratorio indican que estas líneas tienen grano largo y translúcido (0.2 de centro blanco), un contenido de amilosa entre 26% y 29%, y un excelente rendimiento de molinería (60% de arroz entero).

Estos y otros datos preliminares sugieren que la especie silvestre *O. barthii* no afectó en forma negativa las características culinarias de las líneas mejoradas con que se cruzó; antes bien, las muestras de grano de los cruzamiento exhibían características que interesaron a los consumidores.

Valor nutricional del arroz silvestre

Se escogieron 11 cultivares de arroz, entre ellos los silvestres *O. barthii*,

O. glaberrima y *O. rufipogon,* para determinar el contenido de Fe y de Zn de su grano. Se tomaron muestras de arroz blanco y de arroz integral en las parcelas cultivadas con esos materiales en el CIAT. Se enviaron submuestras de 5 g al laboratorio para hacerles un análisis químico según el método propuesto por Isaac y Kerber (1971). El experimento, que fue replicado tres veces, se resume en el Cuadro 5. Para el estudio estadístico se usó la prueba del Rango Múltiple de Duncan al 5% de nivel de significancia. Los principales resultados se comentan a continuación:

- Hubo diferencias significativas entre los cultivares en relación con el contenido de Fe y de Zn del grano, tanto en el arroz integral como en el arroz pulido.
- El efecto de la molinería en el contenido de dichos elementos también varió según el cultivar.
- El arroz integral tenía mayor contenido de Fe y de Zn que el arroz pulido, un resultado ya esperado. Hubo una correlación alta (R^2 = 82.09) entre el contenido de Zn del arroz integral y el del arroz pulido; no la hubo, sin embargo, respecto al contenido de Fe. Se puede concluir que el contenido de Zn del arroz integral es un buen indicador de ese contenido en el arroz pulido.
- Los tres primeros valores de contenido de Fe en el arroz integral fueron, en ese orden, los de *O. glaberrima*, de Fedearroz 50 y de Oryzica 1.
- Los tres primeros valores de contenido de Zn en el arroz integral fueron, en ese orden, los de *O. barthii*, de Fedearroz 50 y de las accesiones de *O. glaberrima*.
- El pulimento dado a los granos de arroz (molinería) para obtener arroz blanco redujo el contenido de Fe en 59% y el de Zn en 26%.

Cuadro 5. Efecto del 'molinado' (o molinería) en el promedio del contenido de hierro (Fe) y de zinc (Zn) de los cultivares de arroz seleccionados en el ensayo de caracteres nutricionales.

Línea	Contenido de Fe (%) en grano			Contenido de Zn (%) en grano		
	Integral	Pulido	Red.[a]	Integral	Pulido	Red.[a]
Bg90-2	7.2 f	5.1 h	29.1	17.3 i	13.9 p	19.5
O. barthii	10.4 e	4.2 ij	60.1	27.9 a	22.0 d	21.1
CG-14	10.8 e	6.3 g	41.3	24.8 c	19.7 f	20.4
CT13956-29-M-3-M	10.8 e	3.0 k	72.1	18.4 h	11.9 m	35.3
Fedearroz 50	14.0 b	4.8 hi	65.9	25.6 b	16.7 j	35.0
IG10	12.3 d	3.7 jk	70.1	24.8 c	18.1 h	27.0
O. glaberrima	30.4 a	3.6 jk	88.0	25.0 c	19.2 g	23.3
Oryzica 1	13.5 bc	6.1 g	61.8	16.5 j	11.0 n	24.2
Oryzica Llanos 4	13.0 cd	4.9 hi	54.4	20.8 e	15.7 k	33.3
P1274-6-8-m-1-3-M4452	12.3 d	3.2 k	74.2	13.7 p	10.5 n	23.3
O. rufipogon	10.5 e	6.2 g	41.3	20.5 e	15.7 k	23.6
Promedio líneas	13.2	4.6	59.3	21.4	15.9	26.0
a. Red. = Reducción.	CME = 0.2311 CV = 5.389 GL = 44			CME = 0.1113 CV = 1.805 GL = 44		

- Algunos genotipos respondieron en forma diferente: *O. glaberrima* perdió el 88% del Fe del grano en la molinería, seguida por las líneas CT13956-29-M-3-M y P1274-6-8-M-1-M.
- La accesión CG14, *O. rufipogon* y Oryzica 1 tuvieron mejor comportamiento en molinería que las otras y un contenido de Fe aceptable en el grano pulido; por tanto, pueden recomendarse como progenitores cuando se quiera incrementar el contenido de Fe del grano de otras variedades.
- Por su parte, *O. barthii*, CG14, IG10 y *O. glaberrima* presentaron, en ese orden, el mayor contenido de Zn en los granos de arroz pulidos.

Los resultados anteriores permiten sugerir el uso de las especies silvestres de arroz como progenitores en el mejoramiento de la calidad nutricional del arroz. Hay que mencionar, sin embargo, que las variedades Fedearroz 50 y Oryzica 1, liberadas en Colombia por el convenio ICA–CIAT–Fedearroz, tienen un contenido aceptable de Fe y de Zn en el grano y son productos de un programa de mejoramiento en que no se hizo esfuerzo alguno para mejorar su calidad nutricional. Se puede concluir, por tanto, que no sería difícil mejorar, en general, la calidad nutricional del arroz.

Variabilidad distribuida por los viveros CIAT-ION

Para poner a disposición de los mejoradores y otros usuarios toda la variabilidad genética producida por el proyecto de arroz del CIAT, y para facilitar la selección de materiales relevantes que podrían ser líneas promisorias o progenitores potenciales, se crearon los viveros internacionales de observación, CIAT-ION (International Observation Nursery).

Estos viveros fueron distribuidos entre diferentes entidades y Programas Nacionales de Arroz en América Latina, incluyendo los de Colombia. Los informes recibidos hasta ahora indican que los viveros tuvieron buena acogida, y que los interesados identificaron varias líneas promisorias y las están empleando en los programas nacionales de mejoramiento de arroz. Bolivia y Nicaragua estan próximos a lanzar como variedades comerciales líneas interespecíficas derivadas de cruzamientos entre *O. sativa* x *O. rufipogon* y *O. sativa* x *O. glaberrima.*

Retos y oportunidades futuras

Los principales resultados obtenidos en el período 1999-2003 pueden resumirse en los puntos siguientes:

1. Se amplió la base genética del arroz cultivado en Colombia, mediante la *introgresión*, en variedades mejoradas, de partes del genoma de especies silvestres; dichos fragmentos genómicos están asociados con características agronómicas de importancia económica.
2. Evaluación de más de 37,000 líneas provenientes de cruces interespecíficos, en el que se obtuvieron los siguientes logros:

    a. Desarrollo de *líneas avanzadas* derivadas del cruzamiento Bg90-2 x *O. rufipogon*, cuyo potencial de rendimiento es mayor, en un rango de 10% a 24%, que el de Bg90-2.
    b. Otras características evaluadas en las líneas avanzadas: estabilidad y adaptabilidad buenas a través de distintos ambientes, buen vigor inicial y tallos fuertes.
    c. Desarrollo de líneas avanzadas derivadas del cruzamiento Oryzica 3 x *O. rufipogon*, que son tolerantes del ataque de *Rhizoctonia* sp. Esta tolerancia se observó tanto

en el campo como en el invernadero.

3. Hubo *transferencia* de la resistencia al entorchamiento de *O. glaberrima* a líneas derivadas de cruzamientos con Bg90-2 y Caiapo.
4. Los datos preliminares sugieren que las especies silvestres *O. glaberrima, O. rufipogon, O. barthii* y *O. latifolia* pueden contribuir al mejoramiento de la calidad nutricional y culinaria del arroz.
5. Se mejoró el germoplasma del arroz mediante cruzamientos con especies silvestres, y se obtuvieron *líneas promisorias* de buen potencial de rendimiento, tolerantes de las principales enfermedades, y de buena calidad de grano. Se identificaron además algunas líneas aptas para procesos agroindustriales.
6. Se distribuyó *germoplasma mejorado* a las distintas zonas arroceras de Colombia y a los programas de arroz de otros países mediante los viveros CIAT-ION.
7. Se dio *capacitación* y entrenamiento sobre los métodos empleados al recurso humano colombiano y latinoamericano.

El proyecto presentado en este capítulo debe enfrentar tres retos:

- La incidencia de varias enfermedades —principalmente, piricularia y las causadas por *Rhizoctonia* sp. y por *Sarocladium* sp.— en la producción de arroz.
- Los costos altos de la producción de arroz.
- La urgencia de mejorar la competitividad del sector arrocero.

Para superarlos, es preciso capitalizar los logros obtenidos en el período considerado (1999-2003), es decir, trasladar al desarrollo de mejores variedades los avances obtenidos. Se proponen, por tanto, dos estrategias:

- *Incorporar*, en variedades mejoradas como Fedearroz 50, *genes* de interés asociados con estabilidad ambiental, tolerancia a enfermedades y estrés abiótico, y los relacionados con los componentes del rendimiento, con el fin de incrementar la productividad y la competitividad del arroz. Este trabajo se facilitaría mediante un programa de selección asistida por *marcadores moleculares* confiables, estrechamente ligados a las características de interés, y capaces de funcionar bien en poblaciones segregantes de composición genética distinta. Se espera obtener así variedades cuyo potencial de rendimiento sea mayor que el de Fedearroz 50, que toleren mejor las enfermedades mencionadas, que tengan grano de buena calidad, y que se adapten mejor a diversos ambientes.
- Usar la *variabilidad genética* obtenida en las distintas poblaciones de líneas interespecíficas que se desarrollaron en el proyecto. En el proceso de evaluación y selección de más de 37,000 materiales segregantes de esas poblaciones, se identificaron varias *líneas avanzadas* (derivadas de cruzamientos interespecíficos). Cada línea posee fortalezas que pueden aumentarse y debilidades que es preciso corregir. Mediante un programa selectivo de cruzamientos entre esas líneas y algunos progenitores élite, y gracias a la disponibilidad de marcadores moleculares confiables, es posible 'piramidar' (o sea, reunir en genotipos superiores) las características agronómicas que interesan a los mejoradores. Se espera que los resultados sean similares a los de la estrategia anterior.

En resumen, en la fase 1999-2003 se demostró que las especies silvestres poseen características agronómicas de

interés, y que éstas pueden transferirse al arroz cultivado; en la fase siguiente habrá que consolidar esos logros mediante la recombinación y la concentración de la diversidad genética en genotipos élite que puedan convertirse en variedades comerciales. Puede predecirse un aumento del potencial de rendimiento y una mayor tolerancia de enfermedades en esas variedades, dos características que se traducirán en menores costos de producción del arroz y en mayor competitividad del cultivo en comparación con otras variedades.

Referencias bibliográficas

Aluko, G.; Martínez, C.; Tohme, J.; Castaño, C.; Bergman, C.; Oard, J.H. 2004. QTL mapping of grain quality traits from the interspecific cross *Oryza sativa* x *O. glaberrima.* Theoretical and Applied Genetics 109:630-639.

Brar, D.S.; Bui-Chi-Bun; Nguyen, B.; Li, Z.; Jones, M.; Khush, G.S. 2002. Gene transfer from wild species and molecular characterization of alien introgression in rice. Resúmenes del International Rice Congress, 16-20 de septiembre de 2002, Beijing, China. p. 69.

CIAT (Centro Internacional de Agricultura Tropical). 1992. CIAT-Medium Term Plan 1993-1998. Program plans and resource requirements. Cali, Colombia. 124 p.

Cuevas-Pérez, F.E.; Guimarães, E.P.; Berrío, L.E.; González, D.I. 1992. Genetic base of irrigated rice in Latin America and the Caribbean, 1971 to 1989. Crop Science 32:1054-1059.

De Vicente, M.C.; Tanksley, S.D. 1993. QTL analyisis of transgressive segregation in an interspecific tomato cross. Genetics 134:585-589.

Eberhart, S.A.; Russell, W.A. 1966. Stability parameters for comparing varieties. Crop Science 6:36-40.

Fedearroz (Federación Nacional de Arroceros). 1993. Arroz en Colombia, 1980-1993. Santa Fé de Bogotá, D.C. 88 p.

Fujimaki, H. 1979. Recurrent selection by using genetic male sterility for rice improvement. Japan Agricultural Research Quarterly 13(3):153-156.

Gutiérrez, A.G.; Carabalí, S.J.; Giraldo, O.X.; Martínez, C.P.; Correa, F.; Prado, G.; Tohme, J.; Lorieux, M. 2010. Identification of a rice stripe necrosis virus resistance locus and yield component QTLs using *Oryza sativa* x *O. glaberrima* introgression lines. BMC Plant Biology 2010, 10:6.

Hargrove, T.R.; Coffman, W.R.; Cabanilla, V.L. 1980. Ancestry of improved cultivars of Asian rice *Oryza sativ*a. Crop Science 20:721-727.

Isaac, R.D.; Kerber, J.D. 1971. Atomic absorption and flamephotometry: Techniques and uses in soil, plant and water analysis. In: Walsh, L.M. (ed.). Instrumental methods for analysis of soils and plant tissue. Soil Science Society of America (SSSA), Madison, WI, EE.UU. p. 17-37.

Khush, G.S. 1990. Varietal needs for different environments and breeding strategies. In: Muralidharan, K.; Siddiq, E.A. (eds.). New frontiers in rice research. Directorate of Rice Research, Hyderabad, India. p. 68-75.

Lin, C.S.; Binns, M.R. 1988. A superiority measure of cultivar performance for cultivar x location data. Canadian Journal of Plant Science 68:193-198.

Martínez, C.P.; Borrero, J.; Almeida, A.; Duque, M.C.; Giraldo., O.; Silva, J.; Tohme, J. 2003. Utilization of new alleles from wild rice species to improve cultivated rice in Latin America. In: Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT). Annual report 2003.

Moncada, P.; Martínez, C.P.; Borrero, J.; Châtel, M.; Gauch, H.; Guimarães, E.P.; Tohme, J.; McCouch, S.R. 2001. Quantitative trait loci for yield and yield components in an *Oryza sativa/O. rufipogon* BC_2F_2 population evaluated in an upland environment. Theoretical and Applied Genetics 102:41-52.

Orjuela, J.A. 2006. Primera aproximación hacia la creación de un mapa genético universal en arroz (*Oryza sativa* L.) usando marcadores microsatélites. Tesis (pregrado). Universidad del Tolima. Facultad Ciencias Básicas. Ibagué, Colombia. 112p.

Peng, S.; Khush, G.S.; Cassman, K.G. 1994. Evolution of the new plant ideotype for increased yield potential. In: Cassman, K.G. (ed.). Breaking the yield barrier. Proceedings of the Workshop on Rice Yield Potential in Favorable Environments, IRRI, 29 noviembre-4 diciembre, 1993. International Rice Resesearch Institute (IRRI), Manila, Filipinas. p. 5-20.

Tanksley, S.D.; Nelson, J.C. 1996. Advanced backcross QTL analysis: A method for the simultaneous discovery and transfer of valuable QTLs from unadapted germplasm into elite breeding lines. Theoretical and Applied Genetics 92:191-203.

Tanksley, S.A.; McCouch, S.R. 1997. Seed banks and molecular maps: Unlocking genetic potential from the wild. Science 277:1063-1066.

Thomson, M.J.; Tai, T.H.; McClung, A.M.; Lai, X-H; Hinga, M.E.; Lobos, K.B.; Xu, Y.; Martínez, C.; McCouch, S.R. 2003. Mapping quantitative trait loci for yield, yield components, and morphological traits in an advanced backcross population between *Oryza rufipogon* and the *Oryza sativa* cultivar Jefferson. Theoretical and Applied Genetics 107:479-493.

Watson, S.L.; DeLacey, I.H.; Podlich, D.W.; Basford, K.E. 1999. GEBEI: An analysis package using agglomerative hierarchical classificatory and SVD ordination procedures for genotype x environment data.

Xiao, J.; Li, J.; Grandillo, S.; Ahn, S.N.; Yuan, L.; Tanksley, S.D.; McCouch, S.R. 1998. Identification of trait improving quantitative trait loci alleles from a wild rice relative, *Oryza rufipogon*. Genetics 150:899-909.

Yuan, L.P.; Virmani, S.S. 1988. Status of hybrid rice research and development. In: Hybrid rice. Proceedings of the International Symposium on Hybrid Rice, Changsha, Hunan, China, octubre 6-10, 1986. International Rice Resesearch Institute (IRRI), Manila, Filipinas. p. 8-24.

Zhang, Q. 2007. Strategies for developing green super rice. Proceedings of the National Academy of Sciences 104:16402-16409.

Capítulo 14

Arroz más nutritivo contra la desnutrición en América Latina

César P. Martínez
Jaime Borrero
Myriam Cristina Duque
Silvio J. Carabalí
James Silva
Joe Tohme

Contenido

	Página
Resumen	241
Abstract	242
Introducción	242
Cultivares y análisis	245
Resultados	245
Contenidos de Fe y de Zn	245
Materiales disponibles	247
Discusión	248
Actividades de mejoramiento	248
Oportunidades futuras	251
Conclusiones y recomendaciones	252
Referencias bibliográficas	252

Resumen

Se tratan brevemente tres temas: 1) la información disponible sobre el contenido de hierro (Fe) y zinc (Zn) del grano en 11 cultivares de arroz; 2) los factores que afectan ese contenido; y 3) una estrategia de fitomejoramiento que se propone para incrementar el valor nutricional del arroz en América Latina. Los datos obtenidos, que son sustentados por los resultados del Instituto Internacional de Investigaciones sobre el Arroz (IRRI), indican diferencias significativas entre los cultivares respecto al contenido de Fe y de Zn del grano, tanto en el arroz integral como en el arroz pulido. Se observó además un contenido aceptable de Fe y de Zn en algunas variedades comerciales; éstas, sin embargo, nunca fueron seleccionadas para mejorar este aspecto de su calidad nutricional. Datos científicos recientes indican que el fitomejoramiento es una herramienta eficaz, confiable y de costo razonable para desarrollar germoplasma mejorado, cuyo valor nutricional sea mayor que el de las variedades corrientes. Las investigaciones realizadas por el IRRI, en el marco del proyecto HarvestPlus, y por el CIAT, a través del proyecto AgroSalud, indican que hay variabilidad genética en el arroz

respecto al contenido de Fe y de Zn de su grano. En conclusión, se considera que es factible mejorar la calidad nutricional del arroz en América Latina, tarea en la que se ha logrado avanzar en diversas direcciones.

Abstract

More nutritive rice against malnutrition in Latin America
Three topics are addressed briefly: (1) information available on the Fe and Zn contents of the grain of 11 rice cultivars; (2) factors affecting its contents; and (3) a plant breeding strategy proposed to increase the nutritional value of rice in Latin America. The data obtained are backed up by results obtained by the International Rice Research Institute (IRRI) and reveal significant differences among cultivars regarding rice grain Fe and Zn contents in both rough and polished rice. Acceptable Fe and Zn contents were also observed in several commercial varieties; these, however, were never selected to improve this aspect of nutritional quality. Recent scientific data indicate that plant breeding is an effective and reliable tool of reasonable cost to develop improved germplasm with a better nutritional value than current varieties. Research conducted by IRRI, within the framework of the HarvestPlus project, and by CIAT, through the AgroSalud project, indicates that genetic variability does exist in rice regarding grain Fe and Zn contents. In conclusion, it is considered feasible to improve the nutritional quality of rice in Latin America, and advances have been made in several areas.

Introducción

El arroz es uno de los cereales más importantes en la alimentación humana a nivel mundial y lo es, por tanto, en América Latina y el Caribe (ALC), aunque el área sembrada y el arroz producido en la región son apenas el 4% del total mundial (FAO, 2004). Las nuevas variedades mejoradas y las prácticas de cultivo perfeccionadas (ver **Introducción** de esta obra) incrementaron la producción en ALC, lo que causó un descenso del 50% en los precios al consumidor. El consumo pasó, por tanto, de 10 kg/persona por año (en la década de los 20) a 30 kg/persona por año en los 90. El arroz se ha convertido en la principal fuente de proteína y de calorías de la población más pobre de ALC (Figura 1), es decir, del 40% de la población total de la región (Sanint, 2004; Sanint y Woods, 1998). Ahora bien, se ha observado que, donde la población depende mucho del consumo de arroz, se presentan *problemas nutricionales* relacionados con la deficiencia de minerales y de vitaminas, causa principal de la anemia, la ceguera, el retraso en el crecimiento y otros tipos de discapacidad. Se calcula que hasta 5 millones de niños menores de 5 años mueren anualmente en el mundo por desnutrición; muchos de ellos han tenido acceso sólo a una pequeña ración de arroz o de maíz (El Tiempo, 2009).

La información confiable sobre la extensión y la gravedad de estos problemas nutricionales es incompleta y escasa, pero se sabe ya que los niños, los ancianos y las mujeres embarazadas son los sectores de la población más vulnerables y los que han sido más afectados (Figura 2), no sólo en ALC sino también en Asia y en África. Un informe reciente emitido por el Fondo de las Naciones Unidas para la Infancia (UNICEF) reveló que la tercera parte, al menos, de la población mundial no realiza su potencial físico o intelectual por la carencia severa de vitaminas y de

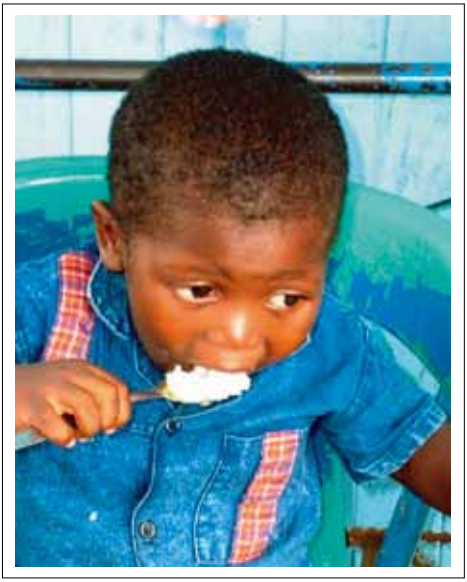


Figura 1. El arroz es la fuente principal de proteína y de calorías de la población más pobre (40% del total) de América Latina.



Figura 2. Las mujeres y los niños son los sectores de la población más vulnerables a los problemas nutricionales, y los que resultan más afectados por ellos.

minerales que padece en su alimentación diaria. Estudios como éste sugieren que la desnutrición trasciende las fronteras geográficas y las clases sociales y que consiste no tanto en comer poco, sino más bien en comer mal. Hay por ello individuos o grupos de individuos que, aun teniendo acceso a una alimentación abundante, pueden estar *mal nutridos*. Este problema es de tal magnitud, que tres de los objetivos de desarrollo fijados por las Naciones Unidas para este milenio (Objetivos del Mileno) se enfocan a combatir la malnutrición, es decir, a erradicar la hambruna (hambre extrema), a reducir la mortalidad infantil y materna, y a mejorar la salud materna (Pinstrup-Andersen, 2000; Underwood, 2000).

En los países consumidores de arroz se han aplicado varias estrategias para combatir la malnutrición; las principales han sido la suplementación con píldoras y cápsulas de vitaminas y minerales (que se distribuyen gratuitamente), y la fortificación del arroz con las vitaminas y los minerales requeridos por la nutrición (los cuales se agregan fisicamente a los granos de arroz durante el proceso de molinería). Aunque los resultados han sido un poco desalentadores, la biofortificación se considera una herramienta adecuada para combatir la desnutrición.

La *biofortificación* es una estrategia cuyo fin es incrementar la calidad nutricional de los cultivos de alto consumo, como el arroz, sin involucrar ningún proceso de transformación genética o transgénico. La biofortificación se vale solamente de cruzamientos dirigidos, en los que se controla la polinización para aprovechar la variabilidad genética de las especies existentes respecto a su contenido de nutrientes. La biofortificación ha demostrado que es eficaz y eficiente (Haas et al., 2005) en el trabajo de aumentar la disponibilidad y la calidad de los nutrientes de los alimentos sin modificar los hábitos alimentarios de una población. La biofortificación

proporciona además los siguientes beneficios:

- Al cultivo de arroz, mayor rendimiento de grano, mayor tolerancia de plagas y enfermedades, y buena calidad industrial.
- Al sector agropecuario de un país, una contribución valiosa a la salud de los grupos de población vulnerable entre los cultivadores de subsistencia.

Los datos científicos recientes indican que el *fitomejoramiento* es una herramienta eficaz, confiable y de costo razonable para desarrollar germoplasma de arroz cuyo valor nutricional sea mayor que el actual (Bouis et al., 2000; Pinstrup-Andersen, 2000). Las investigaciones hechas en el Instituto Internacional de Investigaciones sobre el Arroz (IRRI) en el marco del proyecto HarvestPlus indican que hay *variabilidad genética* en el arroz para el contenido de Fe y de Zn del grano (Cuadro 1). Los datos preliminares obtenidos en el CIAT sustentan esos resultados. Aunque existe la variabilidad genética, los niveles encontrados son muy bajos si los comparamos con los de otros cultivos, como el fríjol; estos niveles son aún más bajos en los granos de arroz blanco pulido, principal forma de consumo del arroz en ALC.

En el arroz integral, el contenido de Fe (de 12 a 21 mg/kg) y el de Zn (de 18 a 36 mg/kg) (Cuadro 1) se acercan mucho a los valores del requerimiento diario de estos micronutrientes para el organismo humano. Los granos de arroz blanco sufren una pérdida grande de estos nutrientes durante el proceso de molinería al que son sometidos. Es mucho más saludable y nutritivo el arroz integral que el arroz pulido; sin embargo, varias sustancias (fitatos y antocianinas, entre otras) en la cutícula del grano de arroz integral disminuyen la biodisponibilidad del Fe y del Zn.

En este estudio se presentan datos del contenido de dos micronutrientes en muestras de grano de diversos cultivares de arroz, su disponibilidad nutricional en el grano y los factores que afectan esa disponibilidad; se propone además una estrategia de fitomejoramiento para incrementar el valor nutricional del arroz que se consume en ALC.

Cuadro 1. Variabilidad genética de materiales escogidos de arroz integral respecto a su contenido de Fe y de Zn.

Materiales analizados	Entradas (no.)	Fe (mg/kg)		Zn (mg/kg)	
		Rango	Media	Rango	Media
Variedades comerciales	40	8.8 – 16.3	11.3	19 – 36	23
Krosnodarshi (ant. URSS)			16.3	–	36
Progenitores del programa de mejoramiento	28	9.2 – 15.8	12.9	17 – 40	25
N22 (Nepal)			15.8		34
Variedades tradicionales	42	9.0 – 21.0	12.9	14 – 36	27
Padi abang gogo (Indonesia)			21.0		35
Payawa (Malasia)			17.5		32
IARC13168 (India)			17.1		34
O19 (Nepal)			16.5		36
Cavitenia (Filipinas)			16.3		18

FUENTE: Gregorio et al., 2000.

Cultivares y análisis

Se escogieron 11 cultivares de arroz, entre los que había variedades comerciales, líneas avanzadas y especies silvestres (*Oryza barthii*, *O. glaberrima* y *O. rufipogon*) y se determinó en ellos los contenidos de Fe y de Zn.

Se tomaron muestras de arroz blanco y de arroz integral de cada cultivar, en parcelas cultivadas en la estación CIAT-Palmira. Se enviaron luego submuestras de 5 g al laboratorio de servicios analíticos del CIAT, donde fueron analizadas mediante espectrofotometría de absorción atómica. De cada submuestra se analizaron tres repeticiones.

Resultados

Contenidos de Fe y de Zn

Se hallaron diferencias significativas entre cultivares respecto al contenido de Fe y de Zn, tanto en el grano integral como en el grano pulido (Cuadro 2). Asimismo, el efecto de la molinería en el contenido de esos minerales en el grano varió según el cultivar. Como se esperaba, el arroz integral presenta mayor contenido de Fe y de Zn que el arroz pulido, un resultado que ya había sido reportado por el IRRI. Estos datos indican, por tanto, que el valor nutricional del arroz integral es mayor que el del arroz blanco pulido.

Los valores obtenidos en el arroz integral son los siguientes:

- **Contenido de Fe.** Los más altos son, en ese orden, el de *O. glaberrima* (30 mg/kg), el de Fedearroz 50 (14 mg/kg) y el de Oryzica 1 (13.5 mg/kg).
- **Contenido de Zn.** Los más altos son, en ese orden, el de *O. barthii* (27.9 mg/kg), el de Fedearroz 50 (25.6 mg/kg), y el de las tres entradas de *O. glaberrima*: MG12 (25 mg/kg), CG-14 (24.8 mg/kg) e IG-10 (24.8 mg/kg).

Cuadro 2. Efecto del 'molinado' en el contenido de Fe y de Zn del grano en varios cultivares y especies silvestres de arroz seleccionados.

Material	Fe (mg/kg) en grano			Zn (mg/kg) en grano		
	Integral (prom.)	Pulido (prom.)	Reducción por molinería (%)	Integral (prom.)	Pulido (prom.)	Reducción por molinería (%)
Bg90-2	7.2	5.1	29.1	17.3	13.9	19.5
O. barthii	10.4	4.2	60.1	27.9	22.0	21.1
CG-14	10.8	6.3	41.3	24.8	19.7	20.4
CT13956-29-M-3-M	10.8	3.0	72.1	18.4	11.9	35.3
Fedearroz 50	14.0	4.8	65.9	25.6	16.7	35.0
IG-10	12.3	3.7	70.1	24.8	18.1	27.0
O. glaberrima (MG12)	30.4	3.6	88.0	25.0	19.2	23.3
Oryzica 1	13.5	6.1	61.8	16.5	11.0	24.2
Oryzica Llanos 4	13.0	4.9	54.4	20.8	15.7	33.3
P1274-6-8-M-1-M	12.3	3.2	74.2	13.7	10.5	23.3
O. rufipogon	10.5	6.2	41.3	20.5	15.7	23.6
Promedio	13.2	4.6	59.3	21.4	15.9	26.0

El proceso de molinería que se hace al arroz integral para obtener arroz blanco redujo el contenido de Fe y de Zn en 59% y 26%, respectivamente. *Oryza glaberrima* perdió el 88% del Fe en ese proceso, seguida por las líneas CT13956-29-M-3-M (72%) y P1274-6-8-M-1-M (74%). La explicación de las pérdidas por pulido del grano de arroz es la siguiente: en su mayor parte, el Fe y el Zn están localizados en las capas externas del grano de arroz (Figura 3) y éstas son removidas cuando se pulen los granos de arroz en la molinería.

Los valores obtenidos en el arroz pulido son los siguientes:

- **Contenido de Fe.** Los más altos son, en ese orden, el de CG-14, el de *O. rufipogon* y el de Oryzica 1.
- **Contenido de Zn.** Los más altos son, en ese orden, los de las especies silvestres *O. barthii* y *O. glaberrima* (MG.12, CG-14 e IG-10).

Los datos sugieren que algunos de los materiales evaluados se pueden emplear como fuente, en un programa de mejoramiento, para mejorar la calidad nutricional del arroz; entre ellos, las especies silvestres CG14 (*O. glaberrima*) y *O. barthii*. Ahora bien, el método convencional de retrocruzamiento es uno de los más indicados para transferir los genes asociados con un mayor contenido de Fe y de Zn en el grano de los materiales exóticos a algunas líneas élite o a ciertas variedades mejoradas. Se desarrollarían así nuevas variedades que tendrán —además de su buen potencial de rendimiento, su tolerancia de las principales plagas y enfermedades, su grano de buena calidad y buena cocción, y su buena capacidad de adaptación— un valor nutricional mucho mayor que el de las variedades corrientes, y servirían además como progenitores en los cruces dirigidos a incrementar el contenido de Fe y de Zn en el arroz pulido.

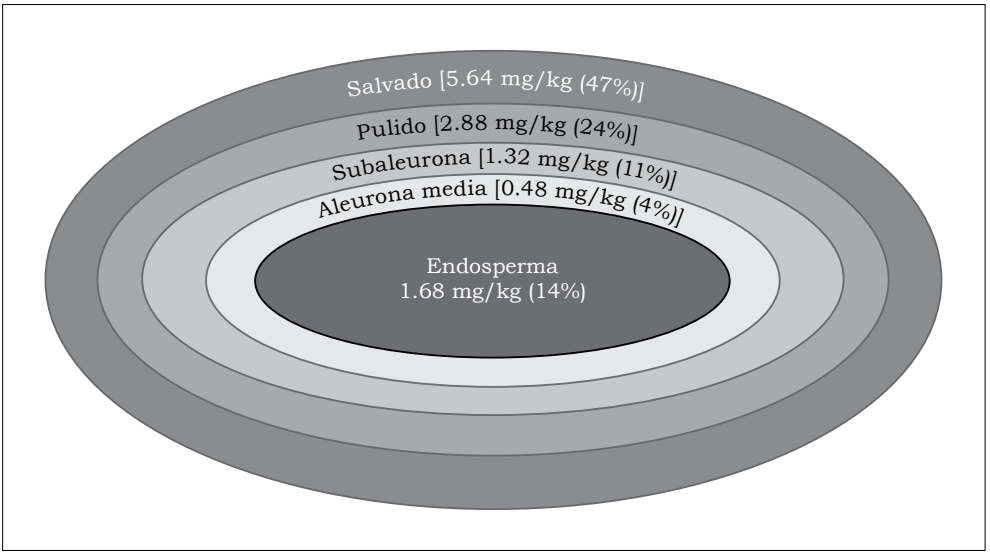


Figura 3. Distribución del contenido total de Fe del grano de arroz (12 mg/kg) en las capas (cutícula o 'salvado', pulimento de molinería o 'pulido', subaleurona y aleurona media) y en el endosperma del grano.

FUENTES: Resurrección et al., 1978; Tanaka et al., 1978.

Materiales disponibles

Los resultados preliminares indican la importancia de las *especies silvestres* en el mejoramiento de la calidad nutricional del arroz. No obstante, las variedades Fedearroz 50 y Oryzica 1 —liberadas en Colombia por Fedearroz y por el convenio ICA-CIAT-Fedearroz, respectivamente— tienen un contenido aceptable de Fe y de Zn y provienen de programas de mejoramiento en que no se hizo esfuerzo alguno para mejorar su calidad nutricional. Por consiguiente, si se hace presión de selección, respecto a esta característica, en las poblaciones segregantes resultantes de cruzamientos entre progenitores que posean las características de interés, habría muchas posibilidades de mejorar la calidad nutricional del arroz en América Latina.

Se hizo un muestreo en el arroz ofrecido en *supermercados y tiendas* populares de varias ciudades de Colombia, Nicaragua, Bolivia y República Dominicana. Los datos del análisis (que no se presentan aquí) indican un contenido promedio de 2 a 3 mg/kg y un contenido de Zn de 17 a 18 mg/kg en el arroz blanco. Éstos serían los *valores básicos* de Fe y de Zn, y a partir de ellos se debe incrementar el contenido de ambos minerales en el grano de arroz para que se refleje en el arroz pulido, cumpliendo así el objetivo de que el consumo de arroz mejorado cause un efecto positivo en la nutrición humana. Los datos de Haas et al. (2005) indican que un pequeño incremento en el contenido de Fe del arroz tuvo un efecto significativo positivo en la reducción de la anemia del segmento de la población filipina estudiada que estaba más afectada por esta enfermedad.

Los proyectos AgroSalud (financiado por la Agencia Canadiense de Desarrollo Internacional, CIDA) y HarvestPlus (financiado por varios donantes, entre ellos la Fundación Bill y Melinda Gates) trabajan en el mejoramiento de la calidad nutricional de varios cultivos básicos (fríjol, maíz, yuca, batata), además del arroz. Su estrategia principal es mejorar la nutrición humana que depende, no de un solo cultivo, sino de una canasta de productos alimenticios, cada uno de los cuales contribuirá, según las preferencias alimenticias de la región o del país, a la nutrición de un sector específico de la población.

La Figura 4 presenta el aumento progresivo del contenido de Fe (mg/kg) en el grano de arroz pulido, que se obtuvo en el proyecto AgroSalud durante los años 2007, 2008 y 2009. Los valores correspondientes a las variedades Fedearroz 50 e IR64 son un promedio de los 3 años de evaluación y provienen de los testigos usados como punto de referencia. Hay un aumento gradual del valor promedio, que pasa de 3.20 a 3.92 y a 5.69 mg/kg en el 2007, el 2008 y el 2009, respectivamente. De modo correlativo, la curva se desplaza hacia la derecha por el efecto de selección; en el 2009, la cantidad de líneas cuyo contenido de Fe era más alto fue proporcionalmente mayor que en los 2 años anteriores.

Los Cuadros 3 y 4 resumen las principales características agronómicas y nutricionales de algunas líneas avanzadas que el CIAT desarrolló y evaluó en colaboración con los siguientes programas nacionales de mejoramiento: Fedearroz de Colombia, INTA de Nicaragua, IIA de Cuba, IDIAF de República Dominicana, *CIAT*-Santa Cruz y ASPAR de Bolivia, y Embrapa/CNPAF de Brasil. Los programas de Bolivia y de Cuba lanzaron, en el 2009, las primeras variedades derivadas del proyecto AgroSalud; lo mismo harán, en el 2010, los de Brasil, Nicaragua y Panamá.

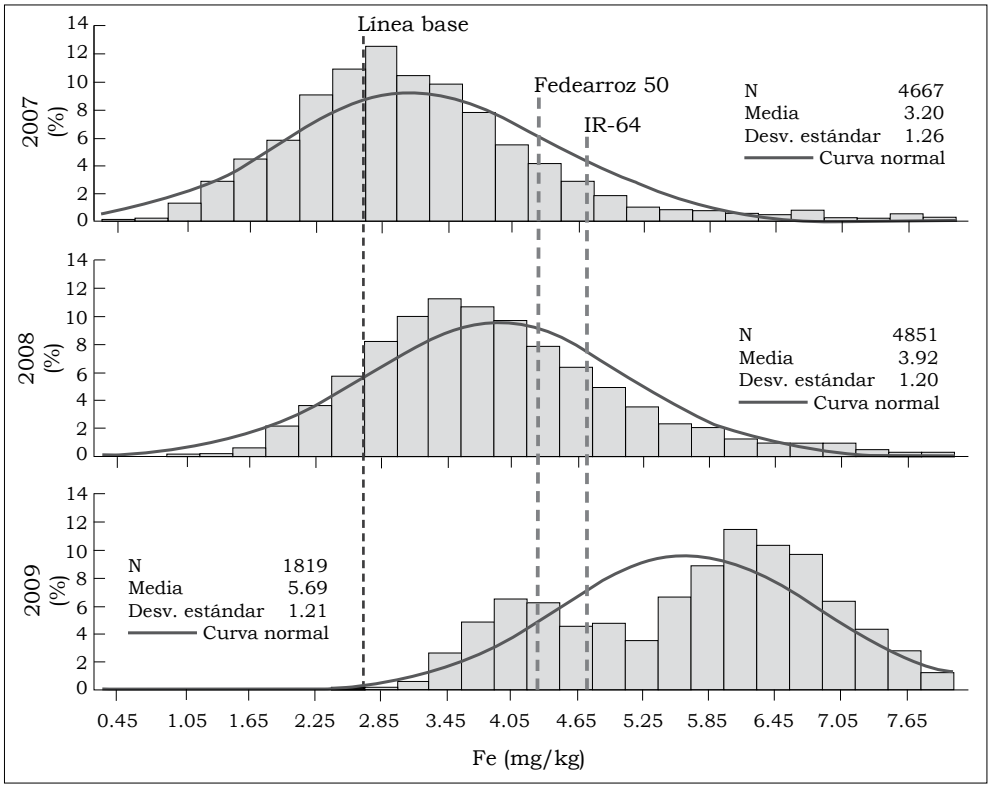


Figura 4. Aumento progresivo del contenido de Fe (mg/kg) en el grano de arroz en el proyecto de mejoramiento AgroSalud (ver explicación en el texto).

Discusión

Actividades de mejoramiento

El proyecto AgroSalud del CIAT pretende aumentar el contenido de Fe y de Zn del grano de algunas variedades de arroz empleando métodos de *mejoramiento convencional*, como la selección masal, la de pedigrí, el retrocruzamiento, el mejoramiento poblacional y la mutagénesis. Trabaja también en la identificación de *marcadores moleculares* asociados con los genes responsables del contenido de Fe y de Zn del grano del arroz; esos marcadores se usarían en un programa de selección asistida por marcadores. Una opción sería aumentar el contenido de esos elementos en las variedades más populares entre los agricultores y mejor aceptadas por ellos (Figura 5). Estas variedades tendrían, en cuanto sea posible, una diferencia visible, como el color del grano, que las distinga de las que no han sido biofortificadas.

Para lograr esos objetivos hay que dar los pasos siguientes:

- Identificar buenos *progenitores* mediante un programa de evaluación del contenido de Fe y de Zn del germoplasma de arroz latinoamericano, que se encuentra en el banco de germoplasma del CIAT y en los bancos de los programas de arroz de los países que participan en el proyecto (Bolivia, Brasil, Colombia, Cuba, Nicaragua, Panamá y República Dominicana).

Cuadro 3. Líneas promisorias de arroz de buenas características agronómicas y de buen contenido nutricional, evaluadas en dos ambientes en Colombia, en el 2007.[a]

Pedigrí	Piedrapintada-Aipe-Huila							CIAT-Palmira, Valle del Cauca								
	Vg	Fl (días)	Ht (cm)	Exs (cm)	A.A. Fe	A.A. Zn	Rend. (kg/ha)	Fl (días)	Clk (%)	Len	Amy (%)	Hb	Exs (%)	A.A. Fe	A.A. Zn	Rend. (kg/ha)
CT17237-1-5-7-2-2-1-M	2	86	95	2.3	5.8	14.6	7737	95	1.0	L	27.7	9	46.9	6.7	14.6	4813
CT17237-1-5-7-2-2-2-M	2	83	99	4.0	6.1	12.5	7326	95	1.6	L	27.0	5	44.7	6.1	15.1	3505
CT17237-1-5-7-2-2-3-M	3	85	103	3.7	8.3	14.2	7173	98	3.4	L	26.4	7	43.5	7.5	13.1	4581
CT17238-1-1-1-2-1-3-M	2	85	107	2.7	6.0	11.6	6609	95	0.8	EL	27.2	5	39.0	4.6	13.3	3918
CT17238-1-1-1-2-3-1-M	2	83	108	2.7	5.5	16.2	6067	103	0.4	EL	26.8	5	55.6	3.6	12.0	3563
CT17238-1-1-1-2-3-4-M	2	84	113	2.7	3.7	14.1	5871	100	0.6	EL	26.6	5	51.4	4.1	11.6	3797
Fedearroz 473	2	92	93	3.0	5.7	14.4	8903	–	–	–	–	–	–	4.7	12.3	–
Fedearroz 50	1	96	104	2.3	3.8	17.7	8539	111	0.2	L	29.5	7	59.9	4.1	15.8	3549

a. Vg = vigor (donde 1 indica planta muy vigorosa y 9 planta muy débil), Fl = floración, Ht = altura de planta, Exs = 'exerción' o proyección de la panícula, A.A. = absorción atómica (mide mg/kg de Fe o de Zn en la muestra), Rend. = rendimiento, Clk = centro blanco ('chalkiness of endosperm', donde 0.2 indica cerca de 0% de opacidad del endospermo y 9 indica más de 20% de opacidad), Len = longitud ('length') del grano (donde L es largo y EL es extralargo), Amy = contenido de amilosa, Hb = hoja blanca (donde 9 indica más susceptible al virus y 0 ninguna incidencia del virus).

Cuadro 4. Líneas avanzadas de buen comportamiento ensayadas en Colombia (Santa Rosa) y en Nicaragua, que tienen buen contenido de Fe y de Zn en el grano.[a]

Pedigrí	Santa Rosa 2005								Santa Rosa 2008								CIAT 2008					
	Vg	Bl 1	Bl 2	Fl	LSc	Bs	NBl	GD	Vg	Bl 1	Bl 2	Fl	LSc	Bs	NBl	GD	Vg	Fl	Hb	kg/ha	Fe (mg/kg)	Zn (mg/kg)
CT16658-5-2-2SR-2-3-6	3	3	3	84	1	1	1	1	1	3	4	86	1	1	3	3	3	109	3	4906.4	5.27	13.02
CT16658-5-2-3SR-2-1-M	3	2	3	85	1	1	1	1	1	3	3	85	1	1	3	3	3	109	3	6092.6	5.22	12.95
CT16658-5-2-3SR-3-1-3	3	3	4	83	3	1	3	1	1	2	3	85	1	1	3	3	3	113	3	5891.5	5.14	12.79
CT15691-4-3-4-2-1-2-M	5	1	2	110	3	3	3	5	3	2	3	88	1	1	3	1	1	113	1	4632.5	5.95	12.64
CT15691-4-3-4-3-2-2-M	5	3	4	94	1	1	3	1	3	2	3	89	1	1	3	3	3	118	1	5307.7	5.90	8.79
CT15659-4-3-1-2-3SR-1-1	3	2	4	92	1	1	3	1	1	2	4	91	1	1	3	3	3	118	1	4258.4	4.90	11.78
CT15659-4-3-1-3-4SR-2-1	3	3	4	92	1	1	3	1	1	1	3	91	1	1	3	1	3	118	1	4475.5	5.12	11.18
CT15696-3-4-1-1-3SR-1-2	3	5	4	96	1	1	3	1	3	2	3	91	1	1	5	3	3	113	1	7296.6	6.45	9.28
CT15696-3-4-1-1-3SR-2-2	3	5	4	96	1	1	3	1	3	2	4	93	1	1	5	3	3	113	1	6459.5	6.59	8.66
CT15716-6-1-2-3-2SR-M-4	3	4	5	88	3	5	3	3	3	5	6	87	3	5	5	3	3	113	3	6088.2	4.05	9.87
CT15717-7-1-1-1-2SR-M-2	3	4	3	90	1	1	3	3	3	5	6	87	3	5	5	3	3	113	3	9153.0	4.66	9.51
CT14544-1-M-2-3-3-M-M	3	4	3	97	3	3	5	3	3	3	4	85	1	1	3	1	3	116	3	5518.7	5.99	19.42
CT14544-1-M-2-4-1-M-M	3	4	3	97	3	3	3	3	3	3	3	97	1	1	3	3	3	109	3	4754.5	5.41	20.94
CT18141-6-4-2-2-4-M	3	3	5	81	1	1	1	1	3	3	3	92	1	1	3	1	3	113	5	5268.5	4.98	9.15
CT18145-7-1-1-3-1-M	3	2	2	81	3	3	3	1	3	1	2	85	1	1	3	3	3	109	5	6728.7	5.05	10.86
CT18148-6-9-3-3-2-M	3	3	5	83	5	3	3	3	1	3	3	90	1	1	3	3	5	113	5	7935.2	6.33	9.25
CT18148-6-9-5-1-2-M	3	3	3	82	3	5	3	3	1	3	3	93	1	1	1	1	5	109	5	9149.4	7.12	9.78
CT18148-6-9-5-1-3-4-M	3	3	3	81	3	5	5	3	1	2	3	93	1	1	3	3	5	109	5	7752.2	6.38	10.19
CT18148-10-3-2-2-3-M	1	3	4	78	1	3	3	1	1	3	4	89	1	1	3	5	3	109	5	6738.2	5.01	10.18
CT18148-10-3-2-4-1-M	3	4	5	81	3	3	3	3	3	3	4	88	3	1	3	5	3	109	5	7643.4	5.28	10.24
CT18148-10-3-6-1-6-M	3	3	4	81	3	3	3	3	1	3	3	91	1	1	3	3	3	109	3	8441.3	4.24	10.18
CT18148-10-3-6-4-6-M	1	5	5	79	1	3	3	3	3	3	5	90	1	1	3	3	3	109	3	7828.0	4.56	9.91
Fedearroz 50									3	5	5	87	1	1	5	3	5	105	3	3159.6	5.29	17.29

a. Vg = vigor, Bl = piricularia ('blast') de la hoja (donde Bl 1 es primera evaluación a 30 días de siembra y Bl 2 es segunda evaluación a 45 días de siembra: 1 es poca incidencia y 5 es alta incidencia), Fl = floración (días), LSc = escaldado de la hoja (rincosporiosis, donde 0 indica ninguna lesión y 9 muchas lesiones en la hoja: 51% a 100% del área), Bs = helmintosporiosis (*Bipolaris oryzae*, donde 0 indica ninguna lesión y 9 muchas lesiones en la hoja: 51% a 100% del área), NBl = piricularia del cuello ('neck blast', donde 0 indica sin infección y 9 fuerte infección: 51% a 100% del área), GD = manchado de grano ('grain discoloration', donde 0 indica sin decoloración y 9 fuerte decoloración: de 51% a 100% de diferencia), Hb = hoja blanca, kg/ha = rendimiento en kilogramos por hectárea, Fe = contenido de hierro en mg/kg, Zn = contenido de zinc en mg/kg.

Nota: Las demás variables (vigor, etc.) se explican en la nota al pie del Cuadro 3.



Figura 5. Producción artesanal y cosecha manual del arroz en Bolivia. *CIAT*-Bolivia, 2006.

- Estudiar además la *interacción* 'genotipo x ambiente', ya que los datos obtenidos en el IRRI indican que las condiciones del clima y del suelo influyen en la expresión del contenido de Fe y de Zn del grano de arroz.
- Una vez identificados los progenitores cuyo grano tenga un alto contenido de Fe y de Zn, hacer *cruzamientos* entre algunos de éstos (los donantes) y otros genotipos de alto potencial de rendimiento, tolerantes de enfermedades y de insectos, y cuyo grano sea de buena calidad.
- Conducir programas de *mejoramiento participativo* junto con los programas nacionales de arroz, que involucren a consumidores y a las cadenas de productores de arroz y de semilla (los semillistas); estos últimos manejarán la multiplicación y la distribución de la semilla mejorada. A esta red se integrarán también los sectores relacionados con la nutrición y la salud humanas.

Oportunidades futuras

El futuro plantea a los fitomejoradores del arroz y a las organizaciones arroceras los siguientes retos:

- *Combinar* en una variedad superior de arroz, respecto a las variedades convencionales, un alto potencial de rendimiento, un valor nutricional más alto, mayor resistencia a las plagas y a las enfermedades, y buena calidad de molinería.
- Obtener, como logro definitivo de esa variedad, la buena *aceptación* de los agricultores, de los consumidores, de la industria arrocera y del sector de la molinería.
- Demostrar, como resultado primordial, a la comunidad científica y a los consumidores que el incremento en el contenido de Fe y de Zn del arroz (integral y pulido) tiene un impacto positivo en la *calidad de vida* de los sectores de la población latinoamericana más afectados por las deficiencias de esos elementos, y que ese incremento mejora realmente su vida. Los trabajos recientes (Haas et al., 2005) de evaluación, liberación y adopción de la variedad Maligaya Especial (IR61144-2B-2-2-3) indican que este objetivo es posible.
- Lograr, finalmente, que las variedades de arroz más nutritivas estén al alcance de los consumidores más pobres a un *precio adecuado* a sus limitaciones, reconociendo, tal vez, la necesidad de crear *incentivos* para los agricultores y los consumidores.

Conclusiones y recomendaciones

Los datos obtenidos en el CIAT sustentan los resultados reportados por HarvestPlus en el IRRI. Se encontraron diferencias significativas entre cultivares en relación con los contenidos de Fe y de Zn, tanto en el grano de arroz integral como en el grano blanco pulido, y se observó además un contenido aceptable de Fe y de Zn en el grano de algunas variedades comerciales evaluadas.

Estos resultados sugieren que es posible mejorar la calidad nutricional del arroz en la región de ALC. El contenido de Zn del arroz integral es un buen indicador de ese contenido en el arroz pulido; esta relación no se observó respecto al contenido de Fe.

Referencias bibliográficas

Bouis H.E.; Graham, R.D.; Welch, R.M. 2000. The Consultative Group on International Agricultural Research (CGIAR) micronutrients project: Justification and objectives. Food and Nutrition Bulletin 21(4):374-381.

El Tiempo. 2009. Sección Agropecuaria, Domingo 18 de enero.

FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación). 2004. Cereales: Producción y consumo en 2000-2004. Roma.

Gregorio, G.; Senadhira, D.; Htut, H.; Graham, R.D. 2000. Breeding for trace mineral density in rice. Food and Nutrition Bulletin 21(1):382-386.

Haas, J.D.; Beard, J.L.; Murray-Kolb, L.E.; del Mundo, A.M.; Félix, A.; Gregorio, G.B. 2005. Iron-biofortified rice improves the iron stores of nonanemic Filipino women. Journal of Nutrition 135:2823-2830.

Pinstrup-Andersen, P. 2000. Improving human nutrition through agricultural research: Overwiew and objectives. Food and Nutrition Bulletin 21(1):352-356.

Resurrección, A.P.; Juliano, B.O.; Eggun, B.O. 1978. Preparation and properties of destarched milled rice. Nutrition Reports International 18:17-25.

Sanint, L.R. 2004. Sustaining innovation in the Latin America and Caribbean rice sector. In*:* Pachico, D.; Fujisaka, S. (eds.). Scaling up and out: Achieving widespread impact through agricultural research. Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), Cali, Colombia. p. 93-104.

Sanint, L.R.; Woods, S. 1998. Impact of rice research in Latin America and the Caribbean during the past three decades. In: Pingali, P.; Hossain, M. (eds.). Impact of rice research. Memorias de la International Conference on the Impact of Rice Research celebrada del 3 al 5 de junio de 1996 en Bangkok, Tailandia. Development Research Institute (Bangkok, Tailandia) e International Rice Research Institute, IRRI (Manila, Filipinas).

Tanaka, Y.; Resurrección, A.P.; Juliano, B.O.; Bechtel, D.B. 1978. Properties of whole and undigested fraction of protein bodies of milled rice. Agricultural and Biological Chemistry 42:2015-2023.

Underwood, B.A. 2000. Overcoming micronutrient deficiencies in developing countries: Is there a role for agriculture? Food and Nutrition Bulletin 21(1):356-360.

Capítulo 15

Transformación genética del arroz

Eddie Tabares

Contenido

	Página
Resumen	253
Abstract	254
Introducción	254
Herramientas	255
Organismos modificados	256
Sistemas de transformación genética	256
Biolística	256
Sistema de *Agrobacterium*	257
Genes marcadores	260
Problemas y perspectivas	265
Cepas y genotipos	265
Bioeconomía	266
Arroz transgénico en el CIAT	267
Contra el VHB	267
Contra el añublo de la vaina	268
Contra la sequía	269
Referencias bibliográficas	271
Anexo: Ilustración detallada de los pasos que requiere la transformación genética del arroz mediante el sistema *Agrobacterium*	275

Resumen

El arroz fue, entre las monocotiledóneas, la primera especie cultivada que experimentó transformación y regeneración genéticas. Inicialmente se transformaron cultivares de arroz del grupo japónica. Un tiempo después, fueron transformados numerosos cultivares de los tipos javánica e índica y fueron regenerados como plantas fértiles. En su mayoría, los estudios de transformación del arroz han empleado la transferencia directa del ADN en protoplastos, la cual es inducida en diversos postratamientos. Otros métodos de transformación, menos dependientes del genotipo, fueron desarrollados en años recientes, entre los cuales figuran la transformación por biolística y el sistema de *Agrobacterium tumefaciens*. En ellos se emplean diferentes explantes de la planta de arroz, como embriones inmaduros y maduros e inflorescencias.

Abstract

Genetic transformation in rice

Among monocotyledons, rice is the first cultivated species to undergo genetic transformation and regeneration. Rice cultivars of the japonica group were the first to be transformed, followed by numerous javanica and indica cultivars, which were regenerated as fertile plants. Most rice transformation studies have used direct DNA transfer in protoplasts, induced by different post-treatments. Other transformation methods less dependent on the genotype have been recently developed, including biolistic transformation and use of *Agrobacterium tumefaciens*. Both use rice plant explants, such as inflorescences and mature and immature embryos.

Introducción

La modificación genética de los cultivos mediante los métodos tradicionales ha sido esencial para mejorar la calidad y la abundancia de los alimentos. Los cereales pertenecientes a la familia Poaceae, entre ellos el arroz, proporcionan dos tercios del alimento que consume la población del mundo (Borlaug, 1988). La producción de grano que implica esta responsabilidad crucial se debe, principalmente, al mejoramiento de las variedades nativas durante siglos. Este proceso se inició, en los cereales, por el sistema de mejoramiento genético convencional. La hibridación amplia, en particular, desempeñó un papel importante en el desarrollo de numerosos cultivares de cereales cuyo rendimiento agronómico alcanzó niveles altos (Brar y Khush, 1986; Jauhar y Chibbar, 1999; Jauhar y Peterson, 2001).

La ingeniería genética ha proporcionado, en los últimos años, técnicas más rápidas y mejor dirigidas para introducir características agronómicas útiles en las principales especies cultivadas de cereales. En todo el mundo, los agricultores incrementan actualmente el área de siembra con cultivos mejorados gracias a la biotecnología moderna. La genética y las ciencias afines han ensanchado la 'caja de herramientas' de genes disponibles, y ya hay genes para reducir el estrés biótico causado por malezas, plagas y enfermedades, condiciones adversas que reducen mucho la productividad agrícola.

Los científicos aprovechan actualmente tanto los conocimientos *tradicionales* como los enfoques *modernos* para mejorar el rendimiento de los cultivos y la calidad de los productos agrícolas. El avance en paralelo de esas dos líneas de investigación de la ciencia agrícola pretende reducir las consecuencias ambientales asociadas con el consumo de los recursos naturales (agua, tierra, abonos) que hace la agricultura.

En América Latina y el Caribe (ALC), el arroz aporta más calorías a la dieta de la población que el trigo, el maíz, la yuca o la papa. Se mejora, por tanto, el bienestar de la población de esa región si se eleva la eficiencia de producción del cultivo; esto se logra mejorando el germoplasma del arroz. Las nuevas variedades han hecho más competitivo el sector arrocero latinoamericano y, en consecuencia, los consumidores compran el grano a menor costo y los productores obtienen mayores ganancias. El arroz barato beneficia al 20% de la población más pobre de ALC, que gasta cerca de la mitad de sus ingresos en alimentos (de la cual el 15% va para el arroz).

Los científicos agrícolas enfrentan ahora el siguiente reto: mantener el impulso alcanzado por ese mejoramiento sin dejar de combatir las enfermedades y plagas del cultivo, manteniendo bajos los costos de

producción y reduciendo el riesgo ambiental del uso excesivo de plaguicidas. La solución está en el aumento de la diversidad genética del arroz y en el desarrollo de acervos de genes asociados con rendimientos altos y estables.

Herramientas

El estudio de esa diversidad genética y la identificación de las diferencias genéticas que hay entre posibles progenitores del germoplasma de arroz ha sido crucial para los programas de fitomejoramiento, para quienes regulan la distribución de la semilla comercial, para los productores que eligen la semilla adecuada para siembra, y para las empresas de molinería y de mercadeo del grano. En el pasado reciente, esos trabajos se basaban en la *caracterización agronómica* y morfológica de las semillas y de las plantas.

Los estudios mencionados acudían tradicionalmente a los *métodos bioquímicos*. El análisis electroforético de las proteínas de la semilla, por ejemplo, ha empleado (en el arroz y en otros cereales) la cromatografía líquida de alta resolución (HPLC, en inglés). Otro ejemplo son los perfiles isoenzimáticos empleados en la clasificación del germoplasma. Aunque la información entregada por estas técnicas se considera aceptable, es difícil estandarizarlas, y su capacidad discriminatoria es baja.

En este escenario apareció la *biotecnología,* y su contribución al mejoramiento del cultivo ha sido extraordinaria. Proporciona, por ejemplo, herramientas analíticas que establecen la identidad genética de los cultivares y determinan el nivel de pureza de las semillas. Facilita el mejoramiento de un cultivo cuando el enfoque clásico no ofrece soluciones; por ejemplo, cuando se dispone de muy pocos genes de resistencia estable y duradera a un factor ambiental nocivo. Es útil también para complementar métodos de análisis de proteínas (las cuales son expresiones fenotípicas) y de caracteres agronómicos y botánicos; la herramienta, en este caso, es alguna forma de análisis del genoma, en especial del que se basa en el método de la reacción en cadena de la polimerasa (PCR, en inglés), cuyas técnicas, que han sido ya automatizadas, permiten analizar un gran número de muestras en corto tiempo.

Otra herramienta biotecnológica muy importante es la transformación genética de plantas. Consiste en la incorporación de uno o varios genes de interés agronómico (resistencia a enfermedades o insectos, tolerancia a la sequía) en el genoma de una planta útil. Cuando se obtiene una planta transgénica mediante transferencia directa de genes (por electroporación de protoplastos, bombardeo con partículas o acción de *Agrobacterium* sp.) se requieren, generalmente, genes marcadores seleccionables. Estos genes facilitan la co-integración del gen de interés en un locus mendeliano del genoma de la planta. Obtenido el resultado, es muy deseable eliminar el gen marcador. A esta intención se suma la preocupación de los ecologistas de que el gen marcador seleccionable (o alguno de sus derivados) sea tóxico o alergénico para los consumidores de los productos vegetales (algunos han sido 'etiquetados' en el mercado). Para producir plantas transgénicas libres de genes marcadores negativos (las llamadas 'plantas limpias'), la biotecnología propone el uso de marcadores positivos, los cuales están relacionados generalmente con azúcares; un ejemplo es la enzima isomerasa de la posfomanosa. Puesto que no hay aún comprobación científica de dichos efectos —ni del efecto negativo de genes transferidos tanto antibióticos como resistentes a herbicidas— el público consumidor está en libertad de aceptar las plantas transgénicas.

Las herramientas moleculares que ofrece la biotecnología han sido también empleadas con frecuencia en distintos tipos de análisis de los genes del arroz:

- Mediante el RAPD ('random amplified polymorphic DNA'), que amplifica diversos fragmentos de ADN empleando la PCR antes mencionada y usando 'partidores' de secuencia aleatoria, se han diferenciado varios cultivares de arroz. La técnica RAPD no es muy reproducible y por ello se reserva para estudios comparativos de colecciones de germoplasma de arroz.
- Por medio del AFLP ('amplified fragment length polymorphism') —técnica muy sensible que detecta fragmentos polimórficos (polimorfismos) de ADN combinando una digestión enzimática con una amplificación por PCR, y que entrega patrones de información con más amplificaciones y mayor reproducibilidad que el RAPD (sin requerir información previa del genoma estudiado)— se han identificado cultivares de arroz, se ha analizado la diversidad genética de genotipos de arroz de diverso origen, se han hecho análisis filogenéticos entre los ancestros de la especie cultivada de arroz y sus principales subespecies de los tipos índica y japónica, y mediante selección asistida por marcadores se han mejorado varios materiales de arroz.

Organismos modificados

Hace 13 años, en 1996, se comercializó el primer organismo modificado genéticamente (OGM). Desde entonces, los agricultores han sembrado (James, 2007) cerca de 690 millones de hectáreas (1700 millones de acres) de OGM sin que se haya confirmado un solo daño a la salud humana o al medio ambiente por su causa (FAO, 2004; National Academy of Sciences, 2004; WHO, 2004). En el 2007 se cultivaron 114.3 millones de hectáreas (282.4 millones de acres) de productos agrícolas biotecnlógicos (un nuevo récord) en 23 países; esto representa un incremento del 12.3% en área plantada respecto a los años anteriores (James, 2007).

Los campos cultivados con OGM traen a los agricultores los siguientes beneficios:

- Una reducción en el uso de pesticidas e insecticidas (Brookes y Barfoot, 2007).
- Un incremento en seguridad para las especies vegetales que no son objetivo agrícola (Marvier et al., 2007; OECD, 2003).
- Un aumento en la adopción de la labranza de conservación y de las prácticas de conservación de suelos (Fawcett y Towry, 2002).
- Una reducción en la emisión de gases de invernadero por causa de las prácticas agrícolas (Brookes y Barfoot, 2007).
- Un incremento en la producción agrícola (Brookes y Barfoot, 2007).

Sistemas de transformación genética

Los sistemas de transformación genética han sido desarrollados para una gran variedad de cultivos. En el desarrollo de protocolos para producir plantas transformadas en los cereales se han empleado dos sistemas: el transporte de ADN mediante la bacteria *Agrobacterium tumefaciens* y la biolística o transferencia directa de genes mediante un bombardeo de partículas.

Biolística

La técnica de introducir ADN dentro de las células por medios físicos, es decir, por bombardeo con microproyectiles (Figura 1), ha revolucionado el campo de la transformación genética de las



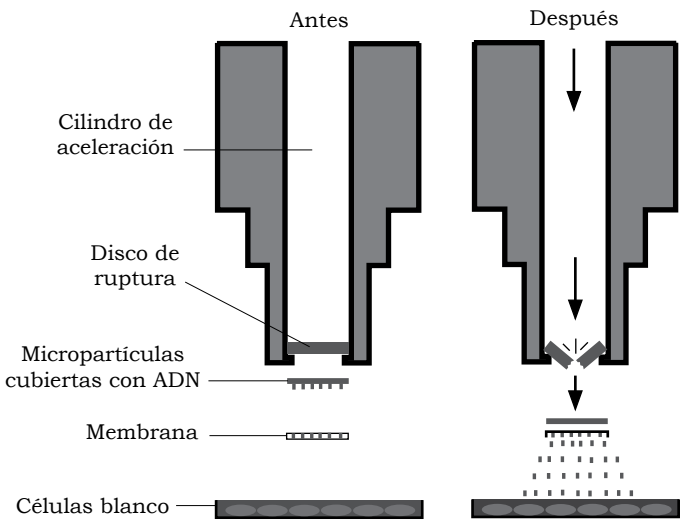


Figura 1. Biolística o bombardeo de células y tejidos con micropartículas.

especies vegetales cultivadas. Infortunadamente, la biolística tiene un grave inconveniente: la variación considerable que se ha observado en el transgene introducido respecto a su estabilidad, a su integración en el genoma y a su expresión en la planta.

Sistema de *Agrobacterium*

La bacteria *Agrobacterium tumefaciens* tiene la capacidad de transferir ADN entre reinos diferentes. El impacto de este hallazgo ha conducido a importantes aplicaciones en diversos campos, como la biología vegetal, la agricultura y la

biotecnología. El conocimiento básico sobre el mecanismo de transferencia de ADN ha permitido el desarrollo de vectores para la introducción de genes foráneos.

Agrobacterium tumefaciens y sus especies relacionadas como *A. rhizogenes* y *A. vitis* son patógenos reconocidos de las plantas, y tienen la capacidad de integrar establemente parte de su material genético dentro del genoma del hospedero. El estudio del mecanismo por el cual *A. tumefaciens* induce la formación de tumores en plantas ha sido fundamental para su uso como herramienta en la ingeniería genética de plantas.

La técnica de transformación mediante bacterias del género *Agrobacterium*, por su parte, facilita la integración precisa de un pequeño número de copias de genes en el genoma de una planta y alcanza un grado considerable de estabilidad del transgene (Dai et al., 2001). La habilidad natural de la bacteria *Agrobacterium tumefaciens* (en adelante, designada como *Agrobacterium*) para entregar un segmento discreto de ADN dentro del recipiente que contiene el genoma de la célula vegetal (Figura 2) ha sido explotada en este sistema para transformar genéticamente los cereales (Cheng et al., 2004).

La transformación de las monocotiledóneas (entre ellas, los cereales) mediante *Agrobacterium* es influenciada por los siguientes factores:

- La selección del genotipo vegetal y del explante que den mejor respuesta.
- La cepa de *Agrobacterium* elegida.
- Los vectores binarios, los cuales son los más usados para la transformación de plantas y de los cuales hay una una gran variedad. En el sistema, *Agrobacterium* tiene dos vectores: uno que contiene la región de T-ADN con el gen de interés, y otro que contiene la región *vir* (o región de virulencia).

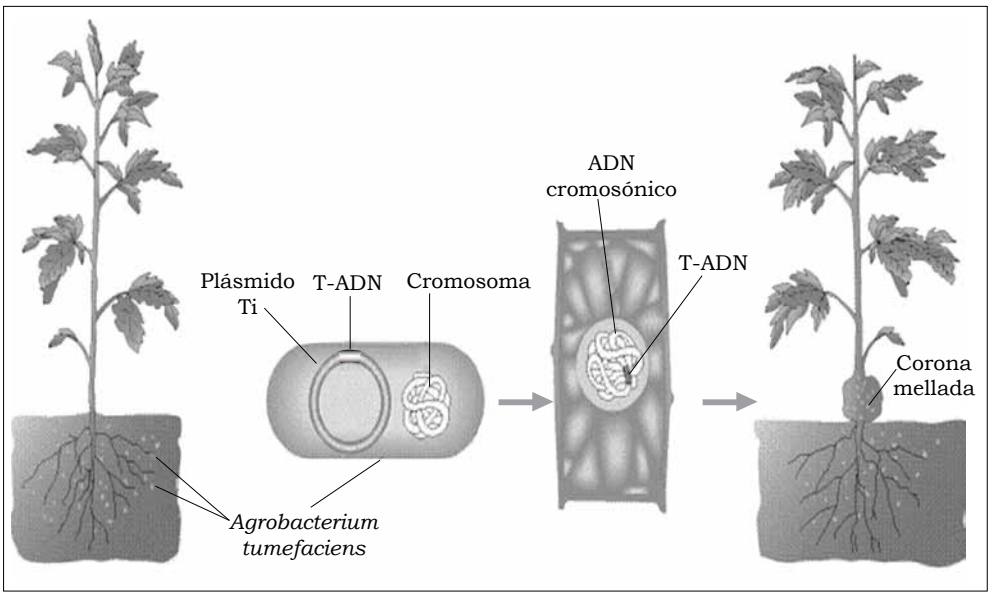


Figura 2. Diagrama de la acción de *Agrobacterium tumefaciens* para formar agallas en las plantas.

- Los vectores co-integrados, que se construyen recombinando tres elementos: un plásmido Ti desarmado que contiene el borde izquierdo, un pequeño vector que contiene el gen de interés flanqueado por el borde derecho, y una región homóloga al borde izquierdo.
- Los genes marcadores, que son utilizados para distinguir entre las células de las plantas transformadas con un gen integrado y la mayor parte de las células transformadas.
- Los genes selectivos y los genes promotores, los cuales permiten distinguir las células de las plantas transformadas de las que no lo han sido.
- Las condiciones de inoculación (medios de cultivo, temperatura, pH) y las del co-cultivo (tiempo de exposición del explante a la bacteria).
- Las condiciones del cultivo de tejidos y de los medios de regeneración.

Por otro lado, la competencia o capacidad de *Agrobacterium* para 'infectar' un tejido específico es todavía un inconveniente de esta técnica de introducción de genes, principalmente de los genes que interesan, en forma más amplia, el mejoramiento de los cereales. Esta limitación puede considerarse como un desafío para el futuro de la transformación genética.

Historia

Durante años, las plantas monocotiledóneas fueron inaccesibles a la manipulación genética. Entre 1987 y 1993, varios laboratorios en todo el mundo hacían grandes esfuerzos para transformar las plantas de ese grupo botánico (entre ellas, los cereales de importancia económica: arroz, cebada y trigo) empleando vectores de *Agrobacterium* (Potrykus, 1991). Los primeros estudios generaron controversias porque, simplemente, no se basaron en un número grande de las plantas transgénicas tratadas, lo que hubiera mostrado la integración en el genoma de los genes deseados.

Un grupo de investigadores chinos liderados por H.S. Chang obtuvieron en 1993 unas pocas plantas transgénicas al inocular embriones inmaduros de arroz con una cepa de *Agrobacterium tumefaciens*. Demostraron, mediante la técnica de hibridización con Southern, que el ADN transferido había sido heredado por la progenie de las plantas tratadas; aunque analizaron la progenie de una sola de las plantas transformadas, el informe que publicaron hizo historia. Hiei et al. (1994) resolvieron la controversia porque produjeron pruebas inequívocas de la transformación estable del arroz de tipo japónica mediante el sistema de *Agrobacterium*, después de hacer los análisis genético y molecular de un gran número de progenies de plantas (R_0, R_1 y R_2).

Resultados

Varias décadas de investigación exhaustiva resultaron en un relativo entendimiento del mecanismo de transferencia del T-ADN de *Agrobacterium* a las células de la planta hospedera. Además, la identificación y la caracterización molecular de los genes vegetales involucrados en la transformación exitosa mediante *Agrobacterium* abrió una vía nueva para comprender mejor la respuesta de la célula vegetal (y de la planta) a la 'infección' causada por *Agrobacterium*.

Se entiende, por ejemplo, que hay un gran número de factores críticos (o condiciones necesarias) en la transformación del arroz por el sistema de *Agrobacterium*; entre ellos, las siguientes:

- El uso de tejidos vegetales de crecimiento activo (embriones

maduros e inmaduros, inflorescencias).
- El uso de acetosiringona (un químico utilizado para la inducción de genes de virulencia o genes *vir*.
- Una temperatura entre 22 y 24 ºC durante el co-cultivo.

Se han publicado, además, los siguientes informes, en la mayoría de los cuales se emplearon embriones inmaduros como explantes:

- Kumlehn et al. (2006) aplicaron con éxito el sistema antes descrito de transformación a variedades de arroz de tipo japónica, javánica e índica.
- Dong et al. (2001) utilizaron inflorescencias inmaduras como explantes.
- En el 2004, Terada y sus colaboradores desarrollaron un protocolo en gran escala muy eficiente para la transformación de arroz con *Agrobacterium*, que genera alrededor de 100 transformantes estables partiendo de 150 semillas.

Se puede concluir que la transformación del arroz mediada por *Agrobacterium* se ha convertido en un método confiable y de fácil reproducción para transferir genes de interés en el genoma del arroz (Figura 3). Estos éxitos pueden atribuirse a diversos factores, uno de los cuales, que resulta crítico, fue el desarrollo de un sistema efectivo para la regeneración de plantas fértiles. En el Cuadro 1 se muestra la transformación genética que se ha realizado en cereales (arroz) usando el sistema de *A. tumefaciens*.

Genes marcadores

Un paso crítico en la regeneración de las plantas transgénicas es la capacidad de distinguir las células transformadas (las que tienen un transgene integrado) de las que no fueron transformadas. El mecanismo tradicional para lograr este objetivo es el empleo de genes marcadores, puesto que la expresión de éstos permite hacer dicha distinción. Ahora bien, cada gen marcador selectivo debe ser 'seguro', lo que plantea un problema potencial de seguridad en ingeniería genética de plantas. Para generar plantas transgénicas en los cereales se han empleado varios genes marcadores selectivos (Cuadro 2). Los que se han usado con mayor frecuencia son los que codifican para las siguientes enzimas (Cheng et al., 2004): la neomicín-fosfotransferasa (npt), la higromicín-fosfotransferasa (hpt) y la fosfinotricín-acetiltransferasa (pat). Usados como marcadores, confieren resistencia, respectivamente, a la kanamicina (y a algunos parientes aminoglicósidos, tales como el G418 y la paramomicina), a la higromicina y a la L-fosfinotricina (PPT). Aunque ha aumentado la demanda de plantas transgénicas libres de marcadores, hay que tener en cuenta que el número de genes marcadores disponibles en un laboratorio, que sean de alta eficiencia en determinada especie vegetal, es aún limitado.

La presencia de genes marcadores en productos agrícolas liberados para el consumo humano parece indeseable; no obstante, esos genes no han presentado hasta ahora riesgos biológicos (Hansen y Wright, 1999). Una de las preocupaciones es que los genes marcadores puedan ser transferidos a algunas malezas o a ciertos microorganismos patógenos, ya sea en el tracto gastrointestinal o en el suelo, haciendo que unas y otros se vuelvan resistentes a tratamientos con herbicidas o antibióticos, respectivamente.

La producción de plantas transgénicas libres de genes marcadores es actualmente un requisito critico para su comercialización. Diferentes estrategias

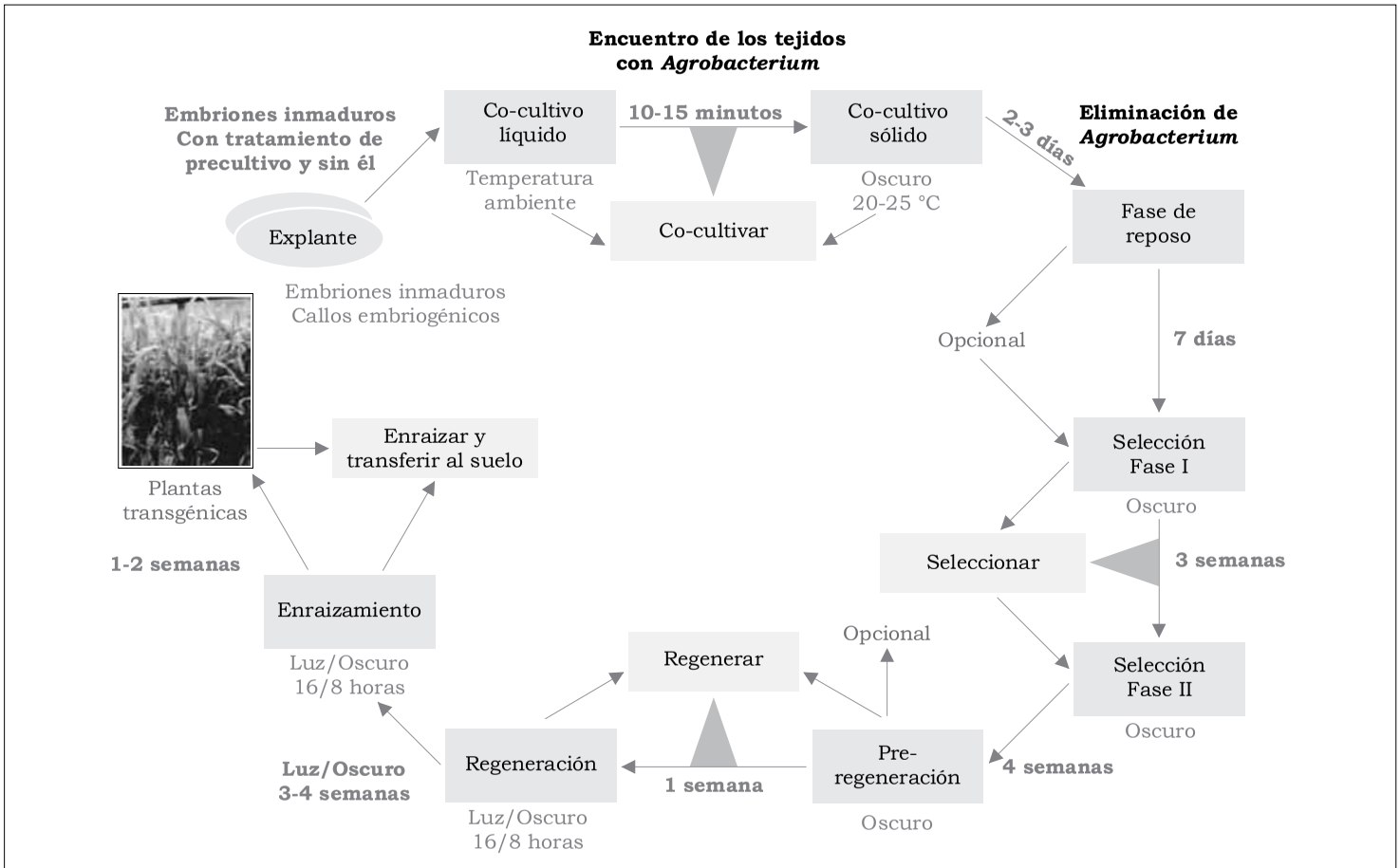


Figura 3. Pasos que se dan, en general, en la transformación de un cereal como el arroz mediante el sistema de *Agrobacterium*.

Cuadro 1. Resultados de la transformación genética obtenida en arroz mediante el sistema de *Agrobacterium*.

Tejido objetivo[a]	Eficiencia de transformación (%)	Promotor o gen reportero	Promotor o gen marcador seleccionable	Referencia
EI, CI	12.8 – 28.6	CaMV3SS:gus	Nos-P:nptII	Hiei et al., 1994
			CaMV3SS:hpt	
EI	1 – 5	CaMV3SS:gus	CaMV3SS:nptII	Aldemita y Hodges, 1996
	27		CaMV3SS:hpt	
CE	-	CaMV3SS:gus	CaMV3SS:hpt	Dong et al., 1996
CE	-	CaMV3SS:gus	Nos-P:nptII	Komari et al., 1996
			CaMV3SS:hpt	
MSI	2.8	-	CaMV3SS:bar	Park et al., 1996
			Act1:bar	
			Nos-P:nptII	
CS	4.8 – 22	CaMV3SS:gus	CaMV3SS:hpt	Rashid et al., 1996
CS	-	-	Nos-P:nptII	Toki, 1997
			Ubi1:bar	
CE	-	Osg68:gus	Osg68:gus	Yokoi et al., 1997
CS		CaMV3SS:gus	CaMV3SS:hpt	Khanna y Raina, 1999
CE	-	CaMV3SS:gus	CaMV3SS:hpt	Mohanty et al., 1999
CE	-	Ubi1:gus	CaMV3SS:hpt	Upadhyaya et al., 2000
CS	-	-	CaMV3SS:hpt	Datta et al., 2000
CE	-	-	CaMV3SS:hpt	Jeon et al., 2000
CE	7	Ubi1:gus	CaMV3SS:hpt	Dai et al., 2001
			Nos-P:nptII	
CE	41	-	CaMV3SS:pmi	Lucca et al., 2001
CE	9 – 19	CaMV3SS:gus	CaMV3SS:hpt	Kumaria et al., 2001
			Nos-P:nptII	
CE	16 – 19	CaMV3SS:gus	CaMV3SS:hpt	Kumaria y Rajan, 2002
			Nos-P:nptII	
CE	6	-	CMPS:pmi	He et al., 2004
CE	64.1 – 378.7	GOS2:gfp	CaMV3SS:hpt	Breitler et al., 2004
			Ubi1:bar	
CE	10^3/150 semillas	CaMV3SS:gus	Act1:hpt	Terada et al., 2004
CE	-	-	CaMV3SS:nptII	Kim et al., 2005
CE	4 – 7.2	-	hpt, nptII	Rui-Feng et al., 2006

a. Las siglas en inglés van entre paréntesis: EI = embrión inmaduro (IE), CI = callo inmaduro (IC), CE = callo embriogénico (EC), MSI = medio en suspensión inmaduro (ISM), CS = cultivo en suspensión (SC).

FUENTE: Shrawat y Lörz (2006).

han sido propuestas para producir esas plantas (Dale y Ow, 1991; Komari et al., 1996; Ebinuma et al., 2001; Hohn et al., 2001; Daley et al., 1998; Corneille et al., 2000; Sahrawat et al., 2003; Breitler et al., 2004; Ramessar et al., 2007).

Cuadro 2. Genes marcadores selectivos empleados en la obtención de plantas transgénicas en el arroz y otros cereales.

Marcador para selección	Característica conferida	Ventajas	Desventajas
A. Negativa			
npt11 (neomicín-fosfotransferasa)	Kanamicina y algunos aminoglicósidos relacionados (como la G418 y la paramomicina), la higromicina y la L-fosfinotricina (PPT)		**Kanamicina:** Puede usarse como agente seleccionable durante la regeneración; no es efectiva en la selección de los callos transformados (sin plantas verdes).
hpt (higromicín-fosfotransferasa)		**Higromicina:** En la inserción de intrones; mejora la frecuencia de las transformaciones (Wang et al., 1997).	
bar (fosfinotricín-acetiltransferasa)		Mejora la estabilidad de la transformación en el arroz y en la cebada.	
B. Positiva			
benciladenín II-3-glucurónido		Plantas transgénicas sin genes de antibióticos o de resistencia a los herbicidas.	
xylosa		Usar la xilosa como fuente de carbohidratos y con abundancia, siempre que las células no transgénicas necesiten alimento.	

(Continúa)

Cuadro 2. (Continuación.)

Marcador para selección	Característica conferida	Ventajas	Desventajas
manosa		**1. PMI:** Cataliza la interconversión reversible de manosa-6-fosfato y fructosa-6-fosfato. El gen E.coli manA (PMI) permite que las células vegetales usen la manosa como fuente de carbohidratos, y que puedan sobrevivir en medios que contengan manosa. **2.** Riesgo ambiental. **3.** Produce plantas transgénicas con mayor frecuencia.	
Butafenil (PPO)		Produjo más de 2500 plantas de maíz tolerantes de algunos herbicidas.	
GFP (proteína de fluorescencia verde)		Se halló que los modelos de número de copias y de integración de transgenes eran similares a los modelos de plantas transgénicas derivadas de un sistema de selección basado en la acción química.	

FUENTE: Shrawat y Lörz (2006).

Problemas y perspectivas

La transformación genética del arroz ha progresado, en años recientes, hasta el punto de que un gen agronómicamente útil puede ser introducido dentro del genoma del arroz utilizando la bacteria *Agrobacterium tumefaciens* como vehículo de entrega del ADN constitutivo de ese gen.

En comparación con el arroz, los demás cereales que interesan a la alimentación humana se han retrasado en la investigación relativa a la transformación genética; ha habido reportes de transformación esporádica y limitada a cultivares específicos. Los mayores obstáculos (o limitantes) que enfrenta la transformación genética de esos cereales son los siguientes:

- El genotipo del cereal y la clase de explante que se emplea en la transformación.
- La presencia de tejidos de color marrón que mueren (necrosis) después de ser infectados con *Agrobacterium*.

Estas limitantes impiden, principalmente, ampliar la gama de hospedantes de la bacteria entre los cultivares comerciales de diversos cereales; pocas plantas se regeneran en estos cultivos.

Cepas y genotipos

Entre los cereales transformados hasta la fecha, el arroz es, al parecer, el que menos depende del genotipo: han sido transformados más de 40 genotipos de los grupos japónica, índica y javánica (Figura 4).

La variación en competencia o habilidad de *Agrobacterium* sp. para 'infectar' un tejido, un genotipo o una especie determinada ha sido uno de los obstáculos en la transformación genética de cultivares élite de cereales. Por ejemplo, McCormac et al. (1998) compararon la eficiencia de la transferencia de T-ADN al trigo que exhiben dos cepas de *Agrobacterium rhizogens* (LBA9402 y EHA101), y encontraron que solamente EHA101 facilitaba una integración exitosa de *Agrobacterium* en ese cereal. En la mayoría de los cereales se ha logrado la transformación genética empleando las siguientes cepas de *Agrobacterium rhizogenes* (Cheng et al., 2004):

- LBA4404 y EHA101.
- Las derivadas de ambas: EHA105 de EHA101; AGLO y AGL1 de LBA4404.

La cepa TOK233 de LBA4404 ha resultado un éxito en la transformación del arroz.

La transformación de cereales por el sistema de *Agrobacterium* mejorará en el futuro cuando se perfeccionen los siguientes aspectos del proceso:

- Ampliar el rango de genotipos y de explantes mejorando, al mismo tiempo, la comprensión de las interacciones hospedante–patógeno.
- Desarrollar nuevos métodos para controlar o minimizar la muerte (necrosis) de los tejidos transformados.
- Identificar proteínas vegetales que puedan participar en la acción de facilitar la entrega de T-ADN al genoma de las células hospedantes.

Estos avances harán más aplicable la transformación genética y mejorarán su eficiencia general.

Asimismo, el análisis profundo de los genes involucrados en la transformación por medio de *Agrobacterium* ayudará a entender mejor los eventos de nivel molecular que ocurren durante ese proceso; por ejemplo, comunicación

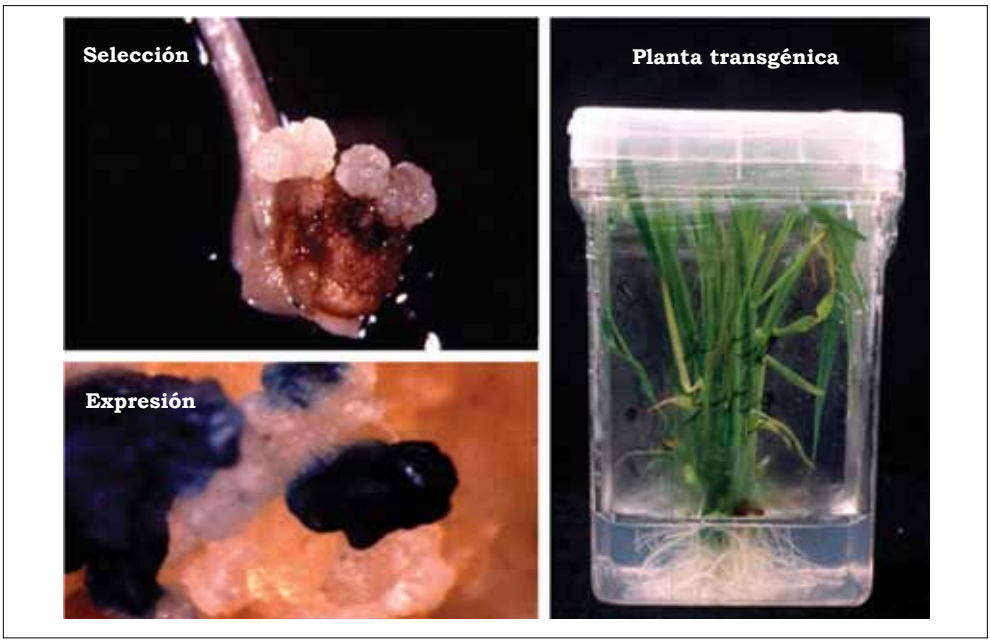


Figura 4. Transformación de plantas de arroz por el sistema de *Agrobacterium.* La eficiencia es de 10% a 44% en las de tipo índica y de 10% a 60% en las de tipo japónica. Se puede evaluar fácilmente, en condiciones de bioseguridad, una alta producción de plantas en invernaderos, en casas de malla y en el campo.

celular, transporte molecular intracelular, reparación y precombinación de ADN. Estos conocimientos contribuirían, a su vez, a ampliar la gama de cultivares élite para la transformación y a mejorar la eficiencia del proceso en cultivos de importancia económica.

Bioeconomía

Los Estados Unidos y otros países se mueven hacia una economía basada en productos vegetales. Han concentrado grandes esfuerzos de investigación y de desarrollo en nuevas materias primas que podrán satisfacer la demanda de biomasa para biocombustibles, bioenergía y bioproductos especializados (como ciertos compuestos industriales y los precursores de los biomateriales). La mayoría de estas proyecciones bioeconómicas hacen un amplio despliegue de las nuevas materias primas cuyo desarrollo depende de las modernas técnicas moleculares de cría. Sin embargo, rara vez consideran los desafíos que plantea el uso de cultivos modificados genéticamente, entre ellos la aprobación oficial, los reglamentos establecidos, el trabajo de mercadeo para lograr la adopción del bioproducto y su aceptación por el público.

Los retos antes mencionados ponen de manifiesto las consecuencias que tienen no sólo los diferentes caracteres de los cultivos transgénicos sino también el desarrollo global de la bioeconomía. Se requiere una toma de conciencia de los problemas que plantean los cultivos y de los caracteres genotípicos que se seleccionarán. Esta comprensión permitirá, a quienes desarrollan los cultivos transgénicos, diseñarlos con el máximo de recursos del cultivo, y dotará

a las partes interesadas de un alto potencial de adopción de diversos productos transformados. Así se evitará la tendencia a satisfacer simplemente las solicitudes de aprobación o de regulación del mercado para ganar la aceptación del público.

Arroz transgénico en el CIAT

En el CIAT se ha establecido un eficiente protocolo de transformación genética de plantas de arroz (Figura 5), dirigido a generar un número considerable de plantas transformadas (eventos) de variedades comerciales, que estén sanas y se adapten a los ecosistemas de arroz con riego y de arroz de tierras altas en América Latina (Lentini et al., 2003).

Contra el VHB

Las primeras plantas de arroz transformadas genéticamente en el CIAT por el sistema de la biolística fueron las plantas transgénicas con resistencia al virus de la hoja blanca del arroz (VHB; RHBV, del inglés). La hoja blanca del arroz es una de las principales enfermedades de este cultivo en América tropical (Morales y Niessen, 1983). La resistencia a este virus es conferida por 1 ó 2 genes, pero las plantas que los poseen son susceptibles antes de los 25 días de edad. La incertidumbre de una epifitia hace recurrir a los agricultores al uso masivo de productos agroquímicos que combatan el vector del virus, un insecto saltahojas de la especie *Tagosodes orizicolus* (Muir).

El virus

El RHBV es un miembro del grupo de los tenuivirus. La caracterización molecular del virus y la preparación de bibliotecas de copias de ADN (ADNc) ha permitido diseñar, en algunas variedades comerciales de arroz, estrategias de resistencia al virus mediante la ingeniería genética. El genoma del RHBV consta de cuatro especies de ARN de cadena sencilla (Ramírez et al., 1992; 1993). La caracterización molecular permitió establecer las secuencias del ARN_3 y del ARN_4 del RHBV, y determinar luego que estos dos genomas codifican, a su vez, para dos genes cada uno y de manera antisentido (Ramírez et al., 1993). La secuencia del ARN_3 del virus codifica para la nucleoproteína (N), conocida en otros tipos de virus como 'proteína de la cubierta'. Se ha comprobado que la expresión de esta proteína, en las plantas transgénicas, es un mecanismo útil para producir resistencia a los virus de las plantas (Beachy et al., 1987).

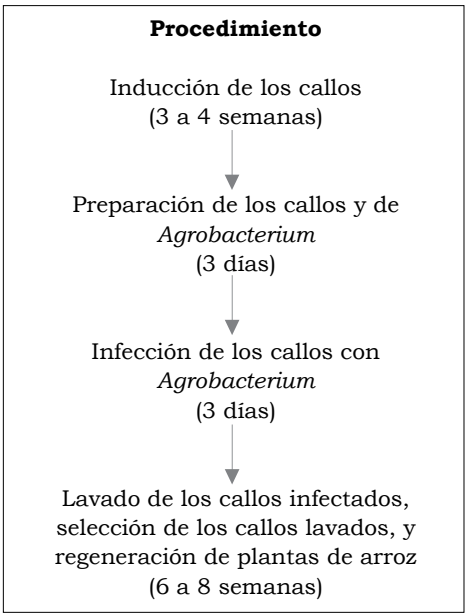


Figura 5. Protocolo desarrollado en el CIAT para lograr una transformación genética del arroz por intermedio de la bacteria *Agrobacterium tumefaciens*.

El proyecto

El objetivo principal del proyecto es proveer una nueva fuente de resistencia al virus para complementar la resistencia simple que está ya presente en algunas

de las variedades comerciales de arroz sembradas en América Latina.

El trabajo realizado permite concluir lo siguiente:

- La protección conferida por el gen que codifica para N (tal como se detectó) consiste en una reducción significativa del progreso y de la severidad de la enfermedad con respecto al testigo inoculado (CICA 8).
- Se observaron también muchas reacciones de resistencia, entre ellas la producción de lesiones localizadas conocidas como 'reacción de resistencia hipersensitiva'.

Los resultados de campo indican que la resistencia transgénica al RHBV puede servir para complementar las fuentes naturales de resistencia al virus. En los cruzamientos realizados, la tercera generación de líneas fue más resistente que los cruzamientos no transgénicos. Este resultado sugiere que la protección conferida por el transgene del RHBV se expresa independientemente de la edad de la planta y de su composición genética. Por consiguiente, el transgene puede usarse para complementar las fuentes naturales de resistencia.

Contra el añublo de la vaina

El hongo *Rhizoctonia solani* causa la enfermedad 'añublo de la vaina' en el arroz, a la que se deben serias pérdidas en la producción de este cereal en América Latina. El Proyecto de Arroz del CIAT desarrolla estrategias para controlar la enfermedad, que reduzcan simultáneamente el uso de fungicidas y otros químicos asociados actualmente a ese control. El trabajo comenzó en los tres frentes siguientes:

- Adaptación, y posterior establecimiento, de metodologías para evaluar la resistencia del arroz al patógeno bajo condiciones de invernadero y de campo.
- Caracterización molecular del patógeno.
- Evaluación de diferentes fuentes potenciales de resistencia o tolerancia a la enfermedad, incluyendo aquí las especies silvestres del género *Oryza*.

Se concluyó que no se conoce aún una fuente de resistencia estable y que todas las variedades ensayadas son susceptibles al patógeno.

Resistencia alterna

Se consideró entonces la especie *Phytolaca americana*, una maleza que se encuentra naturalmente desde los Estados Unidos hasta Argentina, porque es la fuente de numerosas proteínas de propiedades antivirales y antifúngicas ya analizadas. Contiene, por ejemplo, una proteína antiviral (PAP) que inhibe la infección causada por un amplio rango de virus de plantas, ya sea los de tipo ARN o los de tipo ADN (como el virus del mosaico del tabaco). Una colaboradora de este proyecto, la Dra. Nilgun Tumer (Biotechnology Center, Rutgers University, EE.UU.) estudió la proteína PAP y halló que la de 29 kda (kilodaltons) tiene la habilidad de inactivar ribosomas en las células. Ahora bien, las versiones mutadas del gen que codifica para PAP generan una potente actividad antifúngica (Zoubenko et al., 1997).

El proyecto

El objetivo de este proyecto fue incorporar el gen PAP y123, una versión no tóxica del gen que codifica para PAP, en algunas variedades comerciales de arroz que se siembran en América Latina, para conferirles resistencia al hongo *R. solani*.

En trabajos anteriores a los antes mencionados se había demostrado que, en ausencia de infección del patógeno considerado, la proteína PAP parecía

activar tanto la expresión de genes del hospedante (del transgene) que están asociados con la respuesta de hipersensibilidad (HR) como las señales relacionadas con las rutas de traducción de proteínas de defensa. Además, la proteína PAP inhibe la formación de lesiones locales debidas a diferentes virus, por ejemplo los de tipo ARN y algunos de tipo ADN (Chen et al., 1991), proporcionando así un mecanismo de resistencia contra los virus transmitidos por áfidos. Ahora bien, dado que el gen que codifica para la proteína PAP confiere resistencia frente a un amplio rango de patógenos, es interesante evaluar la respuesta de este gen frente al virus de la hoja blanca del arroz (RHBV) y frente a otros virus.

Contra la sequía

En la actualidad, el Proyecto de Arroz del CIAT desarrolla una investigación importante relacionada con algunos genes de resistencia a la sequía. El potencial de rendimiento del arroz, tanto de secano como con riego, depende grandemente de una adecuada disponibilidad de agua durante todo el ciclo de crecimiento de la planta; ahora bien, dado que el arroz con riego, que representa actualmente la mayor producción de este cereal en el mundo, requiere una gran cantidad de agua que compite la que necesitan otras actividades humanas, la prioridad de esta investigación es innegable.

Por otra parte, los campos inundados donde se cultiva el arroz 'paddy' en los países orientales, contribuyen significativamente a incrementar la emisión de metano, un gas asociado con el efecto invernadero; por consiguiente, influyen en el cambio climático. El agua se ha convertido, además, en un recurso escaso en América Latina, a pesar de que en esta región representa, proporcionalmente, la mayor cantidad de agua disponible por persona en el planeta habitado. El incremento de la eficiencia en el uso del agua debe ser, por tanto, una prioridad en el sector arrocero.

Genes y promotores

Poco se conoce sobre el metabolismo molecular asociado con la tolerancia a la sequía en el arroz. La respuesta fisiológica al estrés hídrico se produce a nivel celular, es decir, cuando hay cambios en la expresión de ciertos genes. Se ha demostrado que varios genes del arroz están asociados con la tolerancia de la sequía, de la salinidad y del frío, y codifican para proteínas cuyo propósito es proteger las células del estrés debido a esas condiciones (Shinozaki y Yamaguchi-Shinozaki, 1997).

Algunos genes responden al estrés hídrico con mucha rapidez, mientras que otros son inducidos a responder cuando se acumula ácido abscísico (ABA) en diversos tejidos de la planta. Se han analizado, en tejidos de plantas de *Arabidopsis thaliana*, los promotores de los genes que son inducidos por la deshidratación y el frío; el análisis identificó varios 'elementos' que participan en las respuestas al estrés hídrico dependientes del ABA y en las que son independientes de este promotor. El elemento DRE (elemento de respuesta a la deshidratación) está involucrado en el control de la expresión de los genes de respuesta a la deshidratación de *A. thaliana* y otras especies, y se encuentra en la regiones promotoras de los genes que pueden inducirse a emitir una respuesta a la deshidratación y al frío (Kasuga et al., 1999). El principal control de la expresión de estos genes 'inducibles' por estrés es otro elemento, el DRBE (elemento que se vincula a la respuesta a la deshidratación), que es de carácter proteínico y ha sido caracterizado como factor de transcripción del elemento que

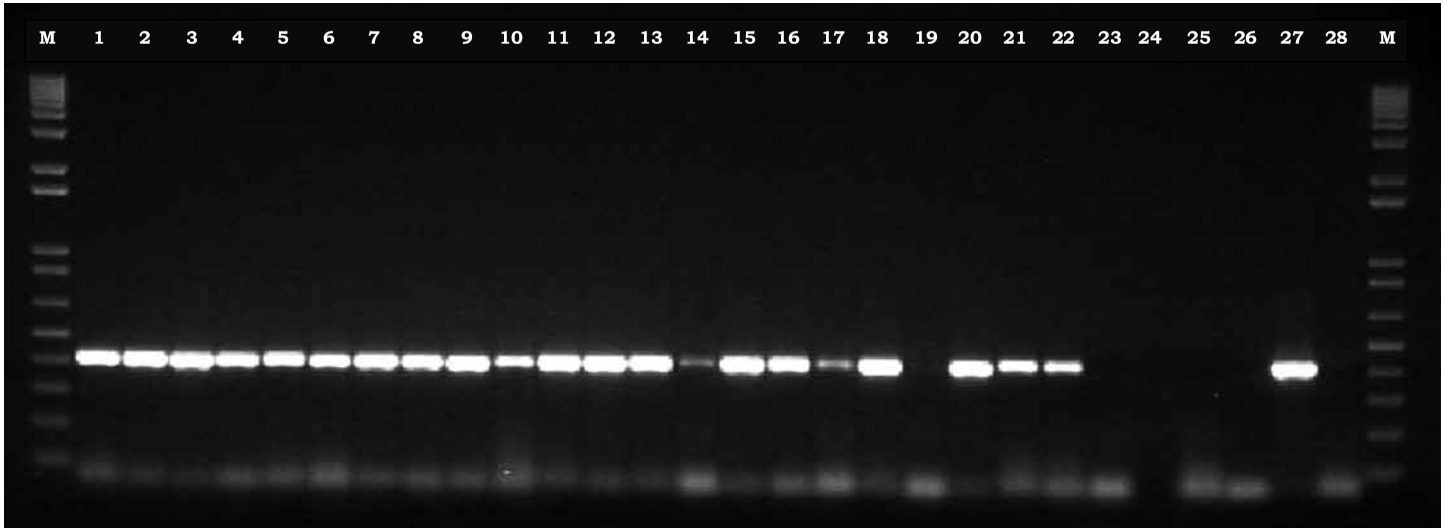


Figura 6. Análisis molecular del ADN de plantas consideradas ya transgénicas. Las líneas 1 a 23 son muestras (la 19 y la 23 son negativas), la línea 24 es un pozo sin ADN, la línea 25 es agua sin ADN, la línea 26 es la variedad Curinga no transgénica, la línea 27 es el ADN del plásmido, la línea 28 es agua sin ADN.

La parte delantera del cebador ('primer') es así: AtDREB1Aseq 3 (CGAGTTTGTTGGCTAATATGGCAG), de 24 pb (pares de bases).
El inverso (o contrario) del cebador es así: (GCCAGTGAATTCCCGATCTAGTA), DE 23 pb.
Tamaño del producto de la RCP ('proteín chain reaction'): 418 pb.
El construido ('construct') es así: pBIHosnac6:DREB1A.

controla la expresión de múltiples genes de respuesta temprana a la sequía (Figura 6).

El DRBE (también conocido como CBF, cell binding factor) y los genes que codifican para el elemento fueron aislados de *A. thaliana* por Liu y sus colaboradores en 1998 y del arroz por Dubouzet y sus colaboradores en el 2003. El DRBE de *A. thaliana* se ha utilizado en un sistema heterólogo y su expresión se probó en el tomate transgénico por Hsieh y sus colaboradores en el 2002. Este enfoque de prueba en transgénicos se ha empleado en los casos siguientes:

- Para mejorar la tolerancia a factores de estrés en especies de plantas en que hay genes que codifican para las enzimas involucradas en la biosíntesis de los diferentes osmo-protectores.
- Para modificar los lípidos de las membranas (por ejemplo, las proteínas LEA) y las enzimas de desintoxicación en plantas cuyos genes codifican para esos productos (Kasuga et al., 1999).

El proyecto

El principal objetivo de este trabajo de investigación del CIAT es probar genes que codifiquen para DRBE, y probar otras secuencias asociadas con la tolerancia de la sequía, con el fin de dar mayor eficiencia en el uso del agua a las líneas comerciales de arroz adaptadas a las condiciones tropicales de América Latina, y para comprender los mecanismos moleculares que explican la forma en que esas líneas toleran el estrés hídrico.

Los genes que codifican para DRBE (provenientes del arroz y de *Arabidopsis*) fueron proporcionados al proyecto por el Dr. Shinozaki, del Centro Internacional de Investigación para las Ciencias Agrícolas del Japón (JIRCAS, sus siglas en inglés). Además, un grupo de investigadores de la Unidad de Biotecnología del CIAT, entre los que figura Manabu Ishitani, ha aislado varios genes codificadores de DRBE en el fríjol común y pone a prueba actualmente la expresión de estos genes bajo condiciones de estrés hídrico.

Referencias bibliográficas

Beachy, R.N.; Rogers, S.G.; Fraley, R.T. 1987. Genetic transformation to confer resistance to plant virus disease. Genetic Engineering 9:229-247.

Borlaug, N.E. 1988. Feeding a world of 10 billion people: The miracle ahead. Plant Tissue Culture and Biotechnology 3:119-127.

Brar, D.S.; Khush, G.S. 1986. Wide hybridization and chromosome manipulation in cereals. In: Evans. D.A.; Ammirato, P.V. (eds.). Handbook of plant cell culture. Macmillan, NY. p. 221-263.

Breitler, J.C.; Vassal, J.M.; Catala, M.D.M.; Meynard, D.; Marfà, V.; Melé, E.; Royer, M.; Murillo, I.; Segundo, B.S.; Guiderdoni, E.; Messeguer, J. 2004. *Bt* rice harbouring *cry* genes controlled by a constitutive or wound-inducible promoter: Protection and transgene expression under Mediterranean field conditions. Plant Biotechnology Journal 2:417-430.

Brookes, N.; Barfoot, P. 2007. Global impact of GM crops: Socio-economic and environmental effects in the first ten years of commercial use. AgBioForum 9:139-151.

Chen, Z.C.; White, R.F.; Antoniw, J.F.; Lin, Q. 1991. Effect of pokeweed antiviral protein (PAP) on the infection of plant viruses. Plant Pathology 40(4):612-620.

Cheng, M.; Lowe, B.A.; Spencer, T.M.; Ye, X.; Amstrong, C.L. 2004. Factors influencing *Agrobacterium*-mediated transformation of monocotyledonous species. In Vitro Cellular and Developmental Biology – Plant 40:31-45.

Corneille, S.; Lutz, K.; Maliga, P. 2000. Conservation of RNA editing between rice and maize plastids: Are most editing events dispensable? Molecular and General Genetics 264:419-424.

Dai, S.; Zheng, P.; Marmey, P.; Zhang, S.; Tian, W.; Chen, S.; Beachy, R.N.; Fauquet, C. 2001. Comparative analysis of transgenic rice plants obtained by *Agrobacterium*-mediated transformation and particle bombardment. Molecular Breeding 7:25-33.

Dale, E.C.; Ow, D.W. 1991. Gene transfer with subsequent removal of the selection gene from the plant genome. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America 88(10):558-562.

Daley, M.; Knauf, V.C.; Summerfelt, K.R.; Turner, J.C. 1998. Co-transformation with one *Agrobacterium tumefaciens* strain containing two binary plasmids as a method for producing marker-free transgenic plants. Plant Cell Reports 17:489-496.

Dong, J.; Kharb, P.; Teng, W.; Hall, T.C. 2001. Characterization of rice transformed via an *Agrobacterium* inflorescence approach. Molecular Breeding 7:187-194.

Dubouzet, J.G. Skum, Y.; Ito, Y.; Kasuga, M.; Dubouzet, E.; Miura, S.; Seki, M.; Shinozaki, K.; Yamaguchi-Shinozaki, K. 2003. DREB genes in rice (*Oryza sativa* L.), encode transcription activators that function in drought–, high-salt– and cold–responsive gene expression. Plant Journal 33:751-763.

Ebinuma, H.; Komamine, A. 2001. MAT (Multi-Auto-Transformation) vector system. The oncogenes of *Agrobacterium* as positive markers for regeneration and selection of marker-free transgenic plants. In Vitro Cellular and Developmental Biology – Plant 37:103-113.

FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación). 2004. Anuario estadístico de la FAO 2004. Roma. v.l, parte 1. Disponible en: www.fao.org

FAO (Food and Agriculture Organization); WHO (World Health Organization). 2008. World agriculture towards 2015-2030. Informe condensado. FAO Economic and Social Department, Roma.

Fawcett, N.; Towry, D. 2002. Conservation tillage and plant biotechnology: How new technologies can improve the environment by reducing the need to plow. Conservatory Technology Information Center, West Lafayette, Indiana, EE.UU. p. 1-24.

Hansen, G.; Wright, M.S. 1999. Recent advances in transformation of agricultural plants. Trends in Plant Science 4:226-231.

Hiei, Y.; Ohta, S.; Komari, T.; Kumashiro, T. 1994. Efficient transformation of rice (*Oryza sativa* L.) mediated by *Agrobacterium* and sequence analysis of the boundaries of the DNA. Plant Journal 6:271-282.

Hohn, B.; Levy, A.A.; Puchta, H. 2001. Elimination of selection markers from transgenic plants. Current Opinion in Biotechnology 12:139-143.

Hsieh, T-H.; Lee, J-T.; Chang, Y-Y.; Chan, M-T. 2002. Tomato plants ectopically expressing *Arabidopsis* CBF1 show enhanced resistance to water deficit stress. Plant Physiology 130:618-626.

James, C. 2007. Global status of commercialized biotech: GM crops 2007. ISAAA Brief No. 37. International Service for the Acquisition of Agrobiotech Applications (ISAAA), Ithaca, NY, EE.UU.

Jauhar, P.P.; Chibbar, R.N. 1999. Chromosome-mediated and direct gene transfers in wheat. Genome 42:570-583.

Jauhar, P.P.; Peterson, T.S. 2001. Hybrids between durum wheat and *Thinopyrum junceiforme*: Prospects for breeding for scab resistance. Euphytica 118:127-136.

Kasuga, M.; Liu, Q.; Miura, S.; Yamaguchi-Shinozaki, K.; Shinozaki, K. 1999. Improving plant drought, salt, and freezing tolerance by gene transfer of a single stress-inducible transcription factor. Nature Biotechnology 17:287-291.

Komari, T.; Hiei, Y.; Saito, Y.; Murai, N.; Kumashiro, T. 1996. Vectors carrying two separate T-DNAs for co-transformation of higher plants mediated by *Agrobacterium tumefaciens* and segregation of transformants free from selection markers. Plant Journal 10:165-174.

Kumlehn, J.; Serazetdinova, L.; Hansel, G.; Becker, D.; Loerz, H. 2006. Genetic transformation of barley (*Hordeum vulgare* L.) via infection of androgenetic pollen cultures with Agrobacterium tumefaciens. Plant Biotechnology Journal 4:251-261.

Lentini, Z.; Lozano, I.; Tabares, E.; Fory, L.; Domínguez, J.; Cuervo, M.; Calvert, L. 2003. Expression and inheritance of hypersensitive resistance to rice Hoja Blanca Virus mediated by the viral nucleocapsid protein gene in transgenic rice. Theoretical and Applied Genetics 106:1018-1026.

Liu, Q.Q.; Zhang, J.L; Wang, Z.Y.; Hong, M.M.; Gu, M.M. 1998. A highly efficient transformation system mediated by *Agrobacterium tumefaciens* in rice. Acta Phytophysiologica Sinensis 24:259-271.

Marvier, M.; McCreedy, C.; Regetz, J.; Kareiva, P. 2007. A meta-analysis of effects of Bt cotton and maize on non-target invertebrates. Science 316:145-147.

McCormac, A.C.; Wu, H.; Bao, M.; Wang, Y.; Xu, R.; Elliott, M.C.; Chen, D.F. 1998. The use of visual marker genes as cellspecific reporters of *Agrobacterium*-mediated T-DNA delivery to wheat (*Triticum aestivum* L.) and barley (*Hordeum vulgare* L.). Euphytica 99:17-25.

Morales, F.J.; Niessen, A.I. 1983. Association of spiral filamentous viruslike particles with rice hoja blanca. Phytopathology 73:971-974.

National Academy of Sciences. 2004. Safety of genetically engineered foods: Approaches to assessing inintendent health effects. The National Academic Press, Washington, DC.

OECD (Organization for Economic Co-operation and Development). 2003. Considerations for the safety assessment of animal feedstuffs derived from genetically modified plants. ENV/JM/MONO. París.

Potrykus, I. 1991. Gene transfer to plants: assessment of public approaches and results. Annual Review of Plant Physiology 42:205-225.

Ramessar, K.; Peremarti, A.; Gómez-Galera, S.; Naqvi, S.; Moralejo, M.; Muñoz, P.; Capell, T.; Christou, P. 2007. Biosafety and risk assessment framework for selectable marker genes in transgenic crop plants: A case of the science not supporting the politics. Transgenic Research 16(3):261-280.

Ramírez, B.C.; Macaya, G.; Calvert, L.; Haenni, A.L. 1992. Rice Hoja Blanca Virus genome characterization and expression *in vitro*. Journal of General Virology 73:1457-1464.

Ramírez, B.C.; Lozano, I.; Constantino, L.M.; Haenni, A.L.; Calvert, L. 1993. Complete nucleotide sequence and coding strategy of rice Hoja Blanca Virus RNA4. Journal of General Virology 74:2463-2468.

Sahrawat, A.K.; Becker, D.; Lütticke, S.; Lörz, H. 2003. Genetic improvement of wheat via alien gene transfer, an assessment. Plant Science 165:1147-1168.

Shinozaki, K.; Yamaguchi-Shinozaki, K. 1996. Molecular responses to drought and cold stress. Current Opinion in Biotechnology 7(2):161-167.

Shinozaki, K.; Yamaguchi-Shinozaki, K. 1997. Gene expression and signal transduction in water-stress response. Plant Physiology 115(2):327-334.

Shrawat, A.K.; Lörz, H. 2006. *Agrobacterium*-mediated transformation of cereals: A promising approach crossing barriers. Plant Biotechnology Journal 4(6):575-603.

WHO (World Health Organization). 2004. Scientific facts on genetically modified crops. Disponible en: www.who.int/foodsafety/publications/biotech

Xiao, H.; Hrdlicka, L.A.; Nambu, J.R. 1996. Alternate functions of the single-minded and rhomboid genes in development of the *Drosophila* ventral neuroectoderm. Mechanisms of Development 58(1-2):65-74.

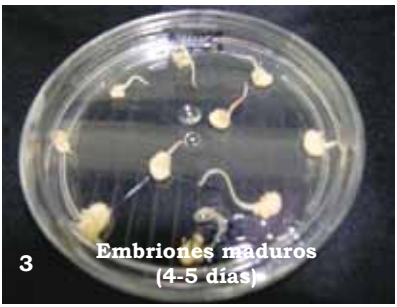
Zoubenko, O.; Unkun, F.; Hur, Y.; Chet, I.; Tumer. N.E. 1997. Plant resistance to fungal infection induced by nontoxic pokeweed antiviral protein mutants. Nature Biotechnology 15(10):992-996.

Anexo

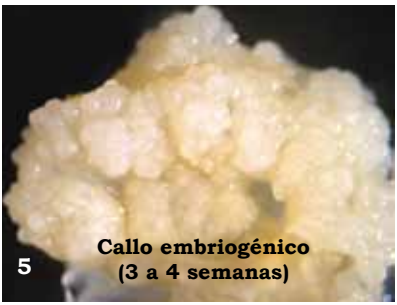
Ilustración detallada de los pasos que requiere la transformación genética del arroz mediante el sistema *Agrobacterium*



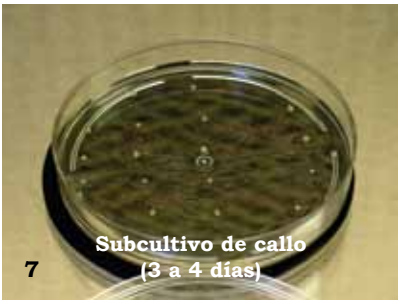






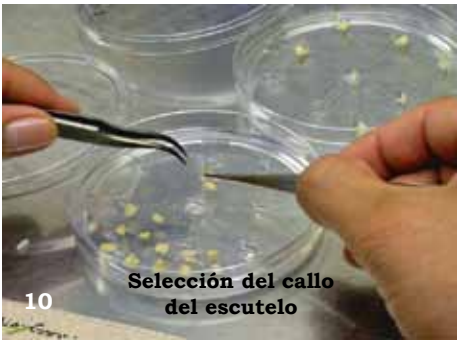


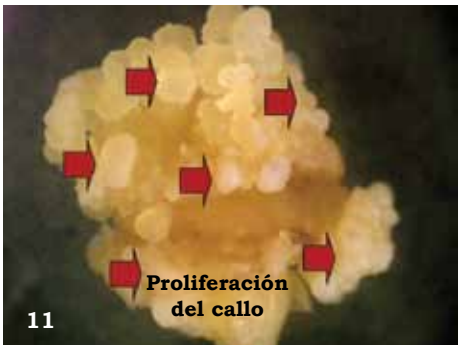







9 5 días después de cultivar a 34 °C


10 Selección del callo del escutelo


11 Proliferación del callo


12 Expresión estable del marcador GUS luego de la selección con higromicina


13 Selección por higromicina (3 a 4 semanas)


14 Regeneración del callo (3 a 4 semanas)


15 Plantas de 2 semanas


16 Aclimatación (endurecimiento) (5 días)

PARTE C

Fertilidad, Nutrición y Manejo Estratégico del Cultivo

BLANCA 278

Capítulo 16

Manejo del suelo en la Altillanura de los Llanos Orientales de Colombia

Jaime Gómez

Contenido

	Página
Resumen	280
Abstract	280
Introducción	280
Orinoquia colombiana: suelos y estrategias	281
Mejoramiento del suelo	282
Tecnología de capa arable	285
Maquinaria para la Altillanura	286
Arado cincel rígido	286
Abonadora y desbrozadora	287
Sembradora de siembra directa	287
Laboreo del suelo	288
Sistemas agropastoriles en la Altillanura	288
Sistema arroz-pastos	289
Bosque de galería	290
Sistema de siembra directa	291
Justificación	291
Suelos para la siembra directa	291
Adopción de la siembra directa	292
Ventajas de la siembra directa	292
Agricultura de conservación	293
Elementos básicos de la agricultura de conservación	293
Leguminosas para rotación	293
Agricultura de precisión	293
Precisión en el manejo por sitio	294
Variabilidad en el campo	294
Tecnología de la agricultura de precisión	296
Procedimientos derivados	297
Labranza por sitio específico	298
Beneficios para el agricultor	300
Referencias bibliográficas	303

Resumen

Se revisan las estrategias empleadas para el manejo adecuado de suelos en la Altillanura de los Llanos Orientales de Colombia, con miras a establecer en esta región sistemas agropecuarios modernos, eficientes y sostenibles. Al respecto, se señalan los avances logrados en el desarrollo de tecnologías dentro del convenio de cooperación técnica y científica entre el CIAT y el Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural de Colombia (Convenio MADR–CIAT), así como del Proyecto de Suelos del CIAT y las diversas instituciones nacionales aliadas al convenio. Dentro de las diversas estrategias desarrolladas y aplicadas en la región se resaltan y describen en detalle los avances en el mejoramiento de suelos, en particular la recuperación de los suelos degradados mediante la tecnología de construcción de una capa arable. De igual manera se tratan otros aspectos relacionados con el mejoramiento y manejo de suelos, tales como el uso adecuado de maquinarias e implementos agrícolas, los sistemas agropastoriles, en especial el sistema de producción a base de arroz-pastos, el sistema de siembra directa y la agricultura de conservación y de precisión.

Abstract

Soil management in the Altillanura of Colombia's Eastern Plains

The strategies used for adequate soil management for the Altillanura (high plains with flat topography) of Colombia's Eastern Plains are reviewed to establish modern, efficient, and sustainable livestock systems in this region. Advances in technology development within the technical and scientific cooperation agreement signed between Colombia's Ministry of Agriculture and Rural Development (MADR) and CIAT, as well as those of the Center's Soils Project and several national institutions co-partners in the agreement. Among the various strategies developed and applied in the region, the advances made in soil improvement are highlighted, in particular the recovery of degraded soils by building an arable layer. Other aspects related to soil improvement and management are also addressed, such as the adequate use of machinery and agricultural implements, agropastoral systems (especially the rice-pasture system), direct planting systems, and conservation and precision agriculture.

Introducción

Un estudio hecho por GLASOD (Global Land Assessment of Soil Degradation), una entidad que evalúa la degradación de los suelos a nivel global, indica que, del total de 8700 millones de hectáreas de tierra que tienen potencial agrícola en el planeta, casi 2000 millones, o sea, el 23%, están degradadas. La degradación de los suelos es un problema mundial que limita la producción de alimentos, la competitividad agrícola y la seguridad alimentaria, en particular en los países pobres que dependen en gran medida de la agricultura como fuente de alimento y de empleo.

La Altillanura colombiana, enmarcada por el río Meta y parte del río Orinoco, es un ecosistema frágil que puede degradarse fácilmente. Dada la gran importancia estratégica que tiene la Altillanura para Colombia, es urgente establecer en ella sistemas de producción agropecuaria modernos, eficientes y sostenibles. Este objetivo se está logrando mediante las tecnologías que generan tanto el convenio de cooperación técnica y científica entre el CIAT y el Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural de Colombia (Convenio MADR–CIAT) como el Proyecto de Suelos del CIAT y las diversas instituciones nacionales aliadas al convenio.

Orinoquia colombiana: suelos y estrategias

La Orinoquia colombiana es una vasta extensión dominada por el ecosistema de sabana; tiene un potencial productivo muy grande y está dotada de abundantes recursos naturales, tanto hídricos como energéticos, forestales, pesqueros, ganaderos y agrícolas, que son muy importantes. El valor que posee el territorio de la Orinoquia radica, principalmente, en la riqueza de los diversos ecosistemas menores que lo constituyen, entre ellos el Piedemonte, la Llanura inundable, el Andén orinoqués y la Altillanura (plana y disectada) cubierta de sabanas.

La Altillanura colombiana se extiende, en los Llanos Orientales, desde el municipio de Puerto López, situado cerca del nacimiento del río Meta y en su margen derecha, hasta la desembocadura de este río en el Orinoco. Por su topografía se divide en plana y disectada (o Serranía). La Altillanura plana es una planicie ondulada cuya área aproximada es de 3.5 millones de hectáreas. En ella predomina la sabana herbácea extensa y continua, de suelos ácidos, en la que se destacan también las especies leñosas agrupadas en los denominados 'bosques de galería', que bordean los cursos de agua. Las características físicas, químicas y biológicas de esta sabana son muy particulares y requieren un manejo especial. La Altillanura plana es, en el departamento del Vichada, la nueva frontera agrícola de Colombia y en ella se implementa actualmente un nuevo desarrollo agroindustrial para el país. La Altillanura disectada o Serranía tiene cerca de 6.3 millones de hectáreas; el Piedemonte, con las tierras más fértiles, tiene 2.5 millones de hectáreas.

La Altillanura (plana y disectada) necesita un manejo especial porque es un agroecosistema frágil. Para poder implantar en él algún sistema de producción sostenible hay que mejorar sus suelos. Los suelos de la Altillanura tienen las características siguientes (Amézquita et al., 2000; 2002):

- Son muy superficiales.
- Son muy susceptibles a la erosión.
- Tienen una estructura débil.
- Su contenido de materia orgánica es bajo.
- Son propensos al 'sellamiento' superficial, es decir, su capa externa se endurece, se encostra y sella el interior del suelo.
- Son duros y su capacidad de aireación es baja.
- No se dejan penetrar fácilmente por las raíces.
- Su contenido de nutrientes y su fertilidad natural son bajos.
- Su acidez es muy alta (pH de 3.8 a 5.0).
- Su contenido de aluminio es alto (mayor que 80%).

En consecuencia, si estos suelos se manejan empleando las prácticas agrícolas tradicionales, su capacidad productiva se deteriora en poco tiempo y su desempeño agrícola decae; cultivarlos se vuelve, por tanto, una tarea insostenible, tanto en términos económicos como ambientales (Rivas et al., 2004). Un monocultivo continuo, como el del arroz, no se desempeña bien en la Altillanura, porque para establecerlo se emplea actualmente, por ejemplo, maquinaria agrícola inadecuada que hace más susceptibles sus suelos a la degradación; en consecuencia, el rendimiento del monocultivo se deteriora rápidamente. ¿Cómo recuperar estos suelos degradados? La respuesta está en la *tecnología de la capa arable*, que se ha aplicado en otras regiones del país y puede adaptarse, como se explica más adelante, a la Altillanura y al Piedemonte llanero (Hoyos et al., 2004).

Las alternativas tecnológicas para el manejo y la conservación de los suelos de la Altillanura giran alrededor del concepto de 'construcción de una capa arable'. Esta tecnología busca transformar un suelo frágil y de baja productividad en un recurso agrícola de alta calidad, mediante prácticas planificadas de mejoramiento físico, químico y biológico del suelo (Figura 1), y empleando germoplasma de cultivos y de pasturas que haya sido mejorado (en este caso, por el CIAT, el CIMMYT y CORPOICA) para que se adapte bien a las condiciones de acidez de la Altillanura.

Mejoramiento del suelo

La construcción de una capa arable implica el mejoramiento del suelo de la Altillanura en los cuatro aspectos siguientes:

Mejoramiento físico
Se logra mediante prácticas de labranza con cinceles rígidos, los cuales fraccionan bien el suelo hasta la profundidad requerida, es decir, hasta 30 o hasta 45 cm, según el sistema de producción que se desee implementar. Estas prácticas mejoran varias de las propiedades del suelo, entre ellas la infiltración del agua (Figura 2), la capacidad de aireación, la distribución de los elementos nutritivos, y la facilidad de penetración de las raíces (Cuadros 1 y 2).

Mejoramiento químico
Antes de la labranza con cinceles, se aplican enmiendas de fertilización, por

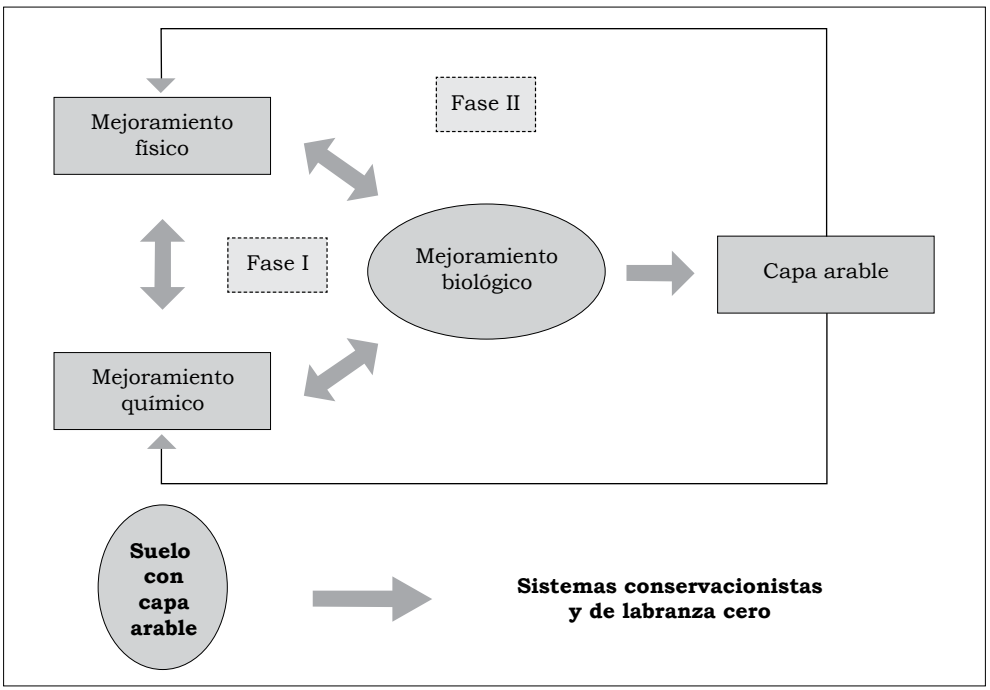


Figura 1. Esquema del desarrollo de una capa superficial arable en la que las limitantes físicas, químicas y biológicas sean mínimas o desaparezcan.
FUENTE: Rivas et al., 2004.

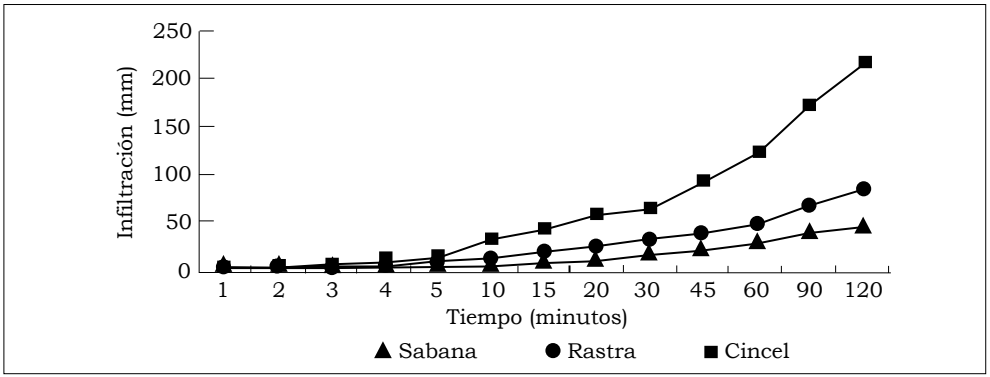


Figura 2. Efecto del implemento de labranza en la infiltración acumulada (finca Matazul, en la Altillanura colombiana).

Cuadro 1. Resultados obtenidos en el segundo año de mejoramiento de un suelo de textura liviana; las medidas se tomaron a 15 cm de profundidad.

Variable (nutriente o propiedad)	En sabana	A profundidad de 0-30 cm	Con labranza de 0-45 cm	Meta para el tercer año
Ca (meq)[a]	0.13	0.66	0.91	1.5
Mg (meq)	0.06	0.35	0.44	0.6
P (ppm)	3.10	7.30	8.80	8.0
M.O. (%)	2.20	2.50	2.30	4.0
DA (g/cc)	1.49	1.33	1.32	1.3
Res. tang. horiz. (Kpa)[a]	51.80	32.90	27.70	Menor de 35
Penetrabilidad (kg/cm^2)	14.50	3.16	3.00	Menor de 10
Infiltración (cm/h)	1.87	8.10	3.40	6-10

a. meq = meq/100 g suelo; M.O. = materia orgánica; DA = densidad aparente; Res. tang. horiz. = resistencia tangencial horizontal.

FUENTE: Hoyos et al., 2004.

Cuadro 2. Resultados obtenidos en el segundo año de mejoramiento de un suelo de textura intermedia; las medidas se tomaron a 15 cm de profundidad.

Variable	En sabana	A profundidad de 0-30 cm	Con labranza de 0-45 cm	Meta para el tercer año
Ca (meq)[a]	0.07	0.66	0.91	1.5
Mg (meq)	0.06	0.35	0.44	0.6
P (ppm)	2.60	7.30	8.80	8.0
M.O. (%)	4.60	2.50	2.30	4.0
DA (g/cc)	1.27	1.33	1.32	1.3
Res. tang. horiz. (Kpa)[a]	66.60	32.90	27.70	Menor de 35
Penetrabilidad (kg/cm^2)	16.20	3.16	3.00	Menor de 10
Infiltración (cm/h)	1.37	8.10	3.40	6-10

a. meq = meq/100 g suelo; M.O. = materia orgánica; DA = densidad aparente; Res. tang. horiz. = resistencia tangencial horizontal.

FUENTE: Hoyos et al., 2004.



Figura 3. Aplicación de dos enmiendas a un suelo de la Altillanura: (A) yeso; (B) cal dolomita.

ejemplo cal dolomita (o dolomítica), Sulcamag, yeso, roca fosfórica o Calfos (Figura 3). La incorporación que hacen los cinceles de esas enmiendas distribuye mejor que la rastra, en profundidad, el calcio y el magnesio. Este efecto se refleja en el siguiente resultado: se reduce más la saturación de aluminio en el perfil del suelo si se hace la labranza con cinceles.

Mejoramiento biológico

Se logra sembrando gramíneas y leguminosas forrajeras genéticamente adaptadas a las condiciones de acidez y de baja fertilidad de los suelos de la Altillanura. Estas especies introducen, gracias a su vigoroso sistema radical, abundantes raíces fibrosas a la profundidad del suelo en que tienen lugar tanto la preparación del suelo como las enmiendas que se le hacen. Se mejoran, además, el contenido de materia orgánica y otras propiedades físicas del suelo.

Mejoramiento integral del suelo

La estrategia global para el mejoramiento integral del suelo comprende, por tanto, los pasos siguientes:

- Desbrozar e incorporar en la sabana la biomasa producida.
- Preparar en época temprana los suelos con arado de cincel rígido.
- Incorporar cal un mes antes de la siembra del arroz.
- Elegir el germoplasma de los cultivos que se sembrarán (arroz, soya, maíz y pastos), el cual debe tener el potencial genético, la calidad, la biomasa forrajera y la biomasa de raíces que requiera el plan de mejoramiento del suelo.
- Sembrar en forma rotativa, en el tiempo, los cultivos, los pastos y las leguminosas forrajeras según las secuencias contenidas en las tres alternativas que se explicarán más adelante.
- Corregir apropiadamente las limitantes físicas y químicas del suelo, según el sistema de producción que se quiera poner en práctica.
- Mejorar el suelo gradualmente favoreciendo el crecimiento de los cultivos sembrados y su aporte de materia orgánica; así se facilitará, más adelante, el crecimiento de otras especies vegetales cuyos requerimientos nutricionales sean mayores que los de los cultivos mencionados.
- Emplear el sistema de siembra directa del arroz, una vez corregidas las limitaciones del suelo (Hoyos et al., 2004).

Tecnología de capa arable

La construcción de una capa arable en un suelo pobre consiste en desarrollar una capa de suelo cuyas limitaciones físicas, químicas y biológicas sean mínimas (Amézquita et al., 2000; 2003; 2004). Construida esta capa, se pueden establecer en ella modernos sistemas de producción agrícola que sean sostenibles y eficientes y, posteriormente, sistemas en que se asocien pastos y cultivos de alta productividad y sostenibles en el tiempo.

Se han desarrollado tres alternativas para la construcción de una capa arable (Figura 4); cada una ofrece, en tres pasos, una secuencia estratégica de pastos y cultivos (Hoyos et al., 2004):

Alternativa 1

1. Siembra y establecimiento de una pastura mejorada.
2. Ceba de novillos en esa pastura durante 2 a 3 años, haciendo fertilización de mantenimiento.
3. Rotación del pasto con cultivos semestrales (maíz y soya) al año siguiente (tercero o cuarto).

Resultado. Transcurridos de 4 a 5 años, la capa arable queda construida (Figura 4).

Alternativa 2

1. Establecimiento de una pastura asociada (arroz + pasto); al cabo de 1 año, la pastura está lista para el pastoreo.
2. Ceba de novillos durante 2 a 3 años, haciendo rotación de praderas (en el pastoreo) y fertilización de mantenimiento.
3. Rotación del arroz (en la asociación arroz + pasto) con maíz en el primer semestre y soya en el segundo semestre (del año tercero o cuarto).

Resultado. Al cabo de 4 a 5 años, la capa arable está disponible.

Alternativa 3

1. Rotación de los cultivos de maíz y soya durante 2 a 3 años.
2. Establecimiento de una pastura asociada (maíz + pasto) al año siguiente (tercero o cuarto).
3. Pastoreo y ceba de novillos un año después (cuarto o quinto).

Resultado. La capa arable queda construida desde el año tercero o cuarto.

Una vez corregidas las limitaciones del suelo de la Altillanura, mediante alguna de las tres alternativas ofrecidas, se programa la siembra directa del arroz.

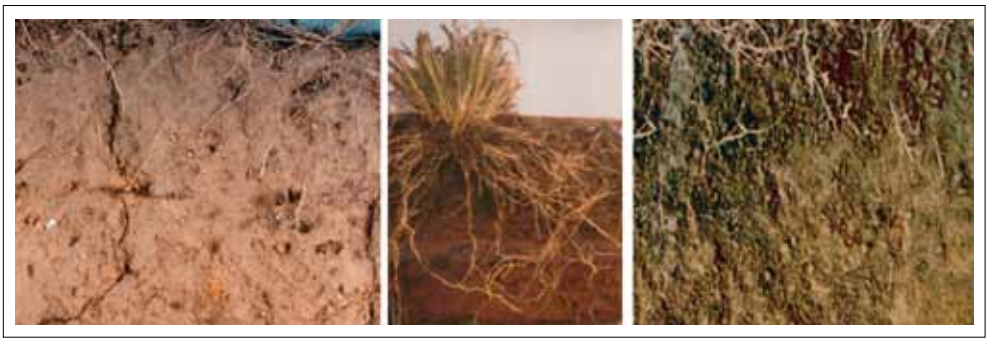


Figura 4. Suelo sin capa arable (izq.); suelos con capa arable (centro y der.).

Maquinaria para la Altillanura

La operación de la maquinaria agrícola en la Altillanura será eficiente y su rendimiento óptimo si se tienen en cuenta cuatro factores en el proceso de su planificación y selección: el clima, el tipo de suelo, el cultivo y el área que se sembrará. Estos factores determinan, por ejemplo, la elección del conjunto tractor-implemento que, si es acertada, ahorrará energía y reducirá los costos de preparación, fertilización y siembra.

El factor suelo es fundamental. No basta con adquirir la maquinaria agrícola: hay que hacerla trabajar en las condiciones adecuadas del suelo. Por ejemplo:

- Si el suelo está *seco*, el laboreo con cinceles, rastras y cultivadoras exige vencer resistencias muy grandes debidas a la tensión molecular del suelo; ese esfuerzo consume mucha energía, que sólo los tractores de alta potencia pueden proporcionar.
- Si el suelo está *húmedo*, la acción de la maquinaria causará una compactación severa de ese suelo.
- Si el suelo está en una condición intermedia, es decir, es de *consistencia friable*, tendrá el nivel óptimo de humedad para el laboreo con máquinas agrícolas. En estos suelos, la maquinaria hará el mejor uso de su energía y ellos no se compactarán.

Los implementos agrícolas que deberían elegirse para trabajar los suelos de la Altillanura de los Llanos Orientales de Colombia se describen a continuación.

Arado cincel rígido

El arado cincel rígido parabólico y con aletas se usa para roturar el suelo y para incorporar en él la cal o el yeso. Su acción logra los siguientes objetivos:

- Destruir las capas compactas del suelo permitiendo que penetren en él tanto el aire de la atmósfera como el agua almacenada bajo la superficie del suelo.
- Permitir un mayor crecimiento de las raíces de las plantas y, por tanto, el desarrollo de plantas más grandes y robustas.
- Contribuir a una roturación profunda del suelo gracias a las aletas que posee el arado.

El arado cincel (Figura 5) es el implemento que menos expone el suelo a la erosión.

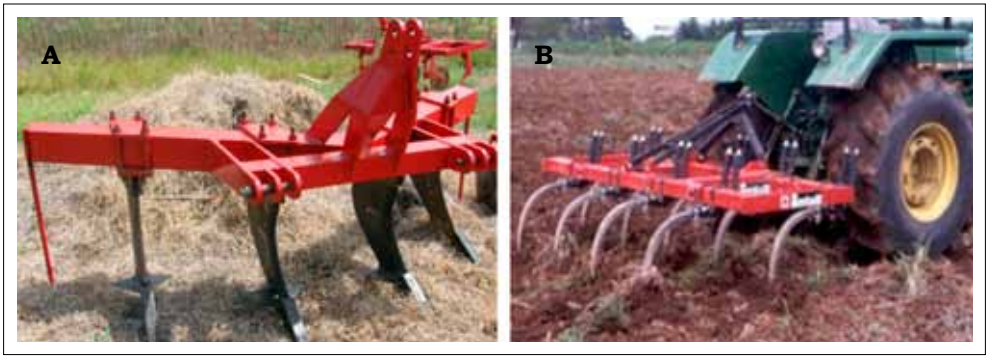


Figura 5. Arado cincel rígido parabólico con aletas: (A) vista frontal del arado; (B) cinceles vibratorios.

Abonadora y desbrozadora

La abonadora se usa principalmente para aplicar la cal o el yeso, dado que los suelos ácidos de la Altillanura requieren enmiendas. El implemento distribuye bien la cal en la superficie del suelo.

La desbrozadora pica finamente los residuos de la cosecha (soca del arroz) y los esparce uniformemente en el terreno. Hace la misma operación con el abono verde y lo esparce para su posterior incorporación en el suelo.

Sembradora de siembra directa

Para seleccionar esta máquina, hay que tener en cuenta, principalmente, las condiciones del terreno y el sistema de producción de arroz.

La sembradora de siembra directa requiere de un tren de siembra de alta eficiencia en el corte del rastrojo, y de discos preparadores distintos de los discos abridores. Se ofrecen diferentes modelos en el mercado. Hay una sembradora de grano fino que aplica también fertilizante y tiene discos de corte corrugados o lisos (Figura 6,A). La sembradora de tolva y cinceles cumple funciones parecidas (Figura 6,B). La elección depende de la clase de cultivo, de la condición del suelo (humedad y textura) y de la cobertura que tenga el suelo.

Hay también sembradoras de tres tolvas: una para el fertilizante, otra para el arroz o el grano fino, y una tercera para semillas de pastos; se usa en los sistemas agropastoriles.

El tren de siembra de estas sembradoras debe poder cumplir las siguientes funciones:

- Cortar el rastrojo de manera eficiente.
- Preparar, haciendo una remocion superficial del suelo, la banda de siembra en que se alojarán las semillas.
- Distribuir las semillas en posiciones equidistantes en el suelo y a una profundidad uniforme.
- Contribuir con su operación al buen desarrollo radicular de las futuras plántulas.
- Evitar la formación de cámaras de aire entorno a las semillas sembradas, y contribuir a la fijación de la semilla en el fondo del surco.
- Tapar la semilla, en el surco, con un camellón de tierra suelta, el cual facilita la emergencia de las plántulas, impide la pérdida de humedad del suelo y evita la formación de una costra en la superficie del suelo por la acción de las lluvias.
- Ofrecer diferentes alternativas para fertilizar el suelo debajo de las semillas.

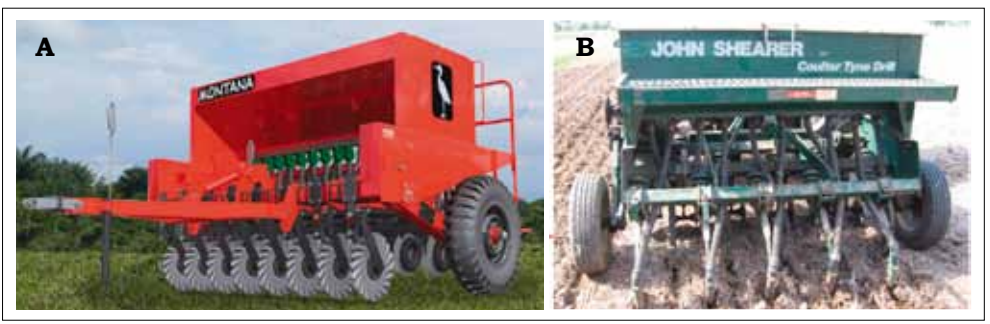


Figura 6. Dos tipos de sembradora: (A) de tolva y discos de corte; (B) de tolva y cinceles.

- Garantizar una presión constante sobre el suelo mediante un doble resorte amortiguador.
- Proporcionar, como opción, las bandas de control de profundidad (Figura 7) recomendadas para los cultivos de arroz en que se levantan caballones.



Figura 7. Tren de siembra directa, con ruedas para el control de la profundidad de siembra.

Laboreo del suelo

Los productores de arroz de la Altillanura colombiana, informados sobre la necesidad de hacer una agricultura de conservación (ver más adelante), han restringido el uso de maquinaria agrícola. En el segundo semestre del año agrícola sólo hacen las siguientes operaciones: labranza vertical con cinceles, encalado, incorporación de material vegetal y siembra directa.

Labranza convencional
La labranza es una práctica agronómica cuyo objetivo es no sólo corregir algunos factores físicos del suelo que limitan el desarrollo de las raíces, sino también mantener ese suelo en condiciones favorables para el crecimiento óptimo de las plantas. Toda labranza requiere de un diagnóstico previo, y no se considera una práctica aislada porque se inicia, en realidad, con el desbroce de los residuos de la cosecha anterior. Si el diagnóstico no encuentra factores limitativos (o éstos son mínimos), se recomienda hacer una siembra directa del arroz; si existen esos factores o el terreno presenta ciertas condiciones de riesgo, se debe sembrar empleando un sistema de mínima labranza y aplicando los principios de la agricultura de conservación.

Mínima labranza
Esta práctica, llamada también labranza conservacionista, consiste en hacer el mínimo de preparación del suelo, es decir, el laboreo indispensable para que las plantas se establezcan correctamente. Se utilizan en ella, de preferencia, los implementos de labranza que no voltean el suelo; por ejemplo, el arado cincel rígido, el arado cincel vibratorio, la rastra de púas, y los escardillos. La práctica es conservacionista porque deja un mínimo de 30% del rastrojo en el suelo.

Sistemas agropastoriles en la Altillanura

El Programa de Arroz del CIAT inició, en 1983, el trabajo de mejoramiento genético del arroz para adaptarlo a los suelos ácidos, y en 1989 se hicieron las primeras siembras de cultivos asociados con pasturas. Estas asociaciones, en que el arroz era un cultivo pionero, permitieron integrar los sectores agrícola y ganadero de esa región.

La investigación que se hacía en ambos sectores había evolucionado en forma independiente hasta 1990, cuando tres científicos del CIAT (Raúl Vera, José Toledo y Robert Zeigler) decidieron integrarla con el fin de proteger el recurso suelo de la Altillanura. Se investigó el germoplasma de los cultivos y de los pastos que se adaptaban a las condiciones agroecológicas de ese ecosistema, principalmente a su alta

saturación de aluminio, y se diseñaron, finalmente, sistemas de producción en que el arroz se asociaba con las pasturas. El arroz se ha convertido así en un componente importante de un sistema de producción agrícola en la Altillanura colombiana.

Sistema arroz-pastos

El Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural de Colombia (MADR) y el Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT) firmaron un convenio de cooperación técnica y científica, conocido como MADR-CIAT 1998-2004, para estudiar el manejo adecuado de la Altillanura colombiana, un ecosistema frágil y muy vulnerable al laboreo mecanizado con rastras (Rivas et al., 2004). El arroz que se ha mejorado en el CIAT para sembrarlo en suelos ácidos se integra a este convenio como componente de un sistema de producción, en el que puede cumplir las siguientes funciones:

- Establecer pasturas mejoradas.
- Recuperar pasturas degradadas.
- 'Construir una capa arable' en el suelo (como elemento de un plan de mejoramiento de suelos) mediante un sistema de rotación de cultivos y pasturas.
- Ser el cultivo principal de un sistema de siembra directa.
- Ser elemento importante en el establecimiento de sistemas agroforestales como cultivo de rotación con la soya, como en las calles de las plantaciones de caucho durante los 2 años iniciales de la plantación.
- Ser el cultivo colonizador en los sistemas agropastoriles o agro-silvopastoriles, dada su tolerancia de los suelos ácidos (Amézquita et al., 2002).

El sistema de producción arroz-pastos consiste en sembrar simultáneamente el arroz y el pasto (éste a una densidad baja) para repoblar una pastura o para sustituir un pasto deteriorado recuperando así la pradera degradada. La Unidad de Suelos y Forrajes del CIAT evaluó este sistema en la Altillanura y obtuvo (Cuadro 3) un rendimiento de arroz entre 2.7 y 3.7 t/ha (Hoyos et al., 2004).

Además de esta función (establecimiento o recuperación de praderas), el sistema de asociación con arroz serviría para rotar cultivos (arroz, soya, maíz) y pastos. Por ejemplo, se inicia sembrando arroz de secano asociado con pastos (sistema agropastoril), y se continúa rotando el arroz con el maíz y la soya: se establece así un proceso de construcción de capa arable, como se indicó antes.

Cuadro 3. Ventajas del sistema agropastoril respecto al sistema pastoril tradicional, en cuanto a la productividad del sistema.

Suelo (dos parámetros)		Productividad del sistema		
Textura	Materia orgánica (%)	Agropastoril		Pastoril
		En arroz (kg/ha)	En carne (kg/ha por año)	En carne: (kg/ha por año)
Arcillosa	4.3	3400	544	141
Franco-arcillosa	3.9	3100	405	—
Franco-arenosa	1.6	2700	222	101

FUENTE: Hoyos et al., 2004.

El arroz encaja muy bien en un sistema en que hace rotación con soya, gracias a su corto período vegetativo. En realidad, las condiciones climáticas de la Altillanura (lluvias entre marzo y noviembre) dejan un margen estrecho para la práctica de la rotación de cultivos.

En los últimos años, el arroz para suelos ácidos ha sido sembrado (como componente de los sistemas mencionados) por agricultores y ganaderos de la Altillanura colombiana, quienes aplicaron el concepto de capa arable y rotaron los cultivos de arroz, maíz y soya; establecieron luego pasturas de alto rendimiento, como la conformada por el pasto Mulato II. La información recibida en el 2008 del Ing. Diego Molina, de la citada Unidad del CIAT, indica rendimientos variables del arroz en este sistema, que dependen de condiciones específicas del manejo del sistema, de la época de siembra y de la rentabilidad de los cultivos escogidos. El rendimiento ha fluctuado, en general, entre 3.5 y 5.0 t/ha.

Bosque de galería

El desarrollo de un sistema de producción agrícola en la Altillanura requiere de un *complemento ecológico*: la conservación de los bosques de galería (Figura 8). Estos bosques son un componente importante del ecosistema de sabana de los Llanos Orientales porque protegen los bancos del río y las pequeñas corrientes de agua, y evitan la erosión de los suelos. Otros beneficios que prestan al ecosistema son los siguientes (Williams, 1990):

- Albergan diversas especies (vegetales y animales).
- Proveen un microclima que modera el ambiente acuático durante la época seca.
- Regulan el caudal de los ríos durante el año.



Figura 8. Bosque de galería en un río de la Altillanura colombiana.

- Absorben el calor del verano, intenso en ese ecosistema.
- Enfrían las masas de agua y las enriquecen.
- Conservan el agua de la sabana.
- Transportan (en las corrientes de agua asociadas) materiales disueltos, sustancias suspendidas, energía y nutrientes hasta los límites entre la sabana y otros ecosistemas.

A pesar de que cubren una zona pequeña (aproximadamente un 16%) del área total del municipio de Puerto López, por ejemplo, los bosques de galería son un micro-ecosistema productivo que incorpora nutrientes, los transforma, y aporta detritos (una forma secundaria de alimento) a las comunidades acuáticas. Son decisivos para mantener la calidad del agua y ofrecen, además, productos naturales que pueden ser aprovechados por los pobladores de la Altillanura.

El bosque de galería funciona como una 'trampa' a través de la cual los nutrientes son transportados al agua (Williams, 1990). Los nutrientes hacen parte de los sedimentos finos que, arrastrados por las aguas, han sido removidos fácilmente del suelo; se encuentran también al final de procesos como la deposición de materiales, la erosión, la infiltración y la dilución (Junk, 1993).

Sistema de siembra directa

Esta tecnología permite sembrar las semillas (de arroz u otro cultivo) sin necesidad de hacer una preparación mecánica del suelo, es decir, abriendo un surco que tenga la anchura y la profundidad suficientes para cubrir la semilla. El suelo para esta siembra ha permanecido cubierto con los residuos de cultivos comerciales anteriores y estos residuos no se retiran después de la siembra. La siembra directa (SD) exige además las siguientes condiciones:

- Suelos sin limitantes químicas, fisicas o biológicas (o que éstas sean mínimas).
- Cobertura vegetal (de rastrojo o de residuos) para el suelo.
- Rotación de cultivos.
- Herbicidas desecantes.

Además, la tecnología de la SD permite economizar combustibles, ahorrar agua y conservar el suelo.

Justificación

Los productores de arroz deben ser competitivos en el mercado global. Ahora bien, la SD les ofrece una oportunidad de lograrlo, por las siguientes razones:

- Les reduce los costos de producción del arroz porque utiliza menos combustible.
- Los vincula a nuevos sistemas de producción, que pueden resultar muy útiles y eficientes.
- Les proporciona ventajas técnicas, bien conocidas por ellos.
- Les permite usar el agua con mucha eficiencia.

Además, la práctica de la SD convierte el suelo de fuente de CO_2 en depósito de carbono; el resultado será un mejoramiento de la fertilidad del suelo.

Suelos para la siembra directa

Se ha desarrollado una clasificación provisional (Amézquita, 2003) de las propiedades del suelo que, bajo condiciones de campo, permiten iniciar favorablemente un sistema de SD del arroz. Es la siguiente:

Suelos con alta posibilidad de éxito
Estos suelos presentan las características siguientes:

- Uniformidad del terreno: alta.
- Agregación del suelo ('self-mulching'): de condición buena.
- Susceptibilidad a la compactación: baja.
- Porosidad: alta
- Consistencia: friable.
- Tasa de infiltración: alta
- Drenaje en el perfil: bueno.
- Pendiente del terreno: plano (de 0 a 7%).
- Actividad biológica: alta.

Suelos con moderada posibilidad de éxito
Estos suelos tienen las características siguientes:

- Variabilidad del suelo: moderada
- Agregación del suelo ('self-mulching'): hay ciertas condiciones, pero el suelo requiere aflojamiento periódico para eliminar su tendencia al 'sellamiento' y a la compactación de su superficie.
- Consistencia: firme.
- Piedras: presentes en el suelo.
- Problemas biológicos: se presentan bajo condiciones específicas.
- Pendiente del terreno: de moderada a ondulada (de 7% a 20%)
- Encharcamiento: presente en las depresiones, cuando llueve.

Suelos con poca posibilidad de éxito
Se caracterizan porque presentan las siguientes condiciones:

- Variabilidad del suelo: extrema, suelo muy poco uniforme.
- Agregación del suelo: no hay buenas condiciones, porque su estructura es inestable; además, es susceptible a la compactación superficial por la alta presión mecánica que reciben y por su baja porosidad.
- Consistencia: dura o plástica.
- Infiltración: baja.
- Drenaje en el perfil: de lento a muy lento.
- Profundidad del suelo: poca, suelos muy superficiales.
- Pendiente: fuerte (> 20%).
- Piedras: presentes en exceso.
- Insectos plaga y patógenos: incidencia alta.

Adopción de la siembra directa

Para que un agricultor pueda adoptar el sistema de SD debería dar los siguientes pasos:

- Mejorar los conocimientos que posea sobre el cultivo del arroz. principalmente los relacionados con el control de malezas.
- Hacer un análisis del suelo; si es necesario, incorporarle una enmienda de cal.
- Evitar los suelos que tengan mal drenaje.
- Nivelar el suelo.
- Recuperar las áreas en que el suelo se haya compactado.
- Mantener el terreno cubierto con la 'paja' del arroz o con una cobertura vegetal.
- Comprar la máquina especializada para la SD.
- Aplicar inicialmente el sistema de SD en el 10% del área del predio arrocero.
- Practicar la rotación de cultivos.
- Mantenerse actualizado en las técnicas de producción de arroz.

Ventajas de la siembra directa

El sistema presenta las siguientes ventajas:

- Se hace un mejor uso del agua.
- Se forman menos capas compactadas en el suelo.
- Se protege el suelo contra la erosión.
- Se mejora el balance de la materia orgánica del suelo.
- Ofrece más oportunidades para la siembra durante el año.

- Reduce el uso de la maquinaria agrícola.
- Permite hacer un ahorro de energía.

Agricultura de conservación

En los sistemas convencionales de producción agrícola se acostumbra mantener el suelo descubierto y expuesto a los agentes climáticos después de cada cosecha. La agricultura de conservación (AC), en cambio, mantiene los residuos de la cosecha en la superficie del terreno, no los incorpora al suelo (Derpsch, 2003). Éste es sólo un ejemplo de que la práctica de la AC supone que el agricultor y el productor de arroz han adquirido nuevos conocimientos; la ausencia de éstos limitaría seriamente la puesta en práctica de la AC y, por ende, del sistema de SD. En realidad, los abonos verdes y la rotación de cultivos deben hacer parte del sistema de SD.

Elementos básicos de la agricultura de conservación

La práctica de la AC comprende los seis elementos básicos siguientes:

- Poca o ninguna remoción del suelo durante su preparación.
- Rotación del arroz con otros cultivos.
- Uso de abonos verdes y de cultivos de cobertura.
- Cobertura permanente del suelo.
- Manejo integrado de insectos plaga y de enfermedades.
- Disminución considerable en el uso de agroquímicos.

Leguminosas para rotación

En la AC, varias especies de leguminosas sirven como cultivos de rotación con el arroz y cumplen las siguientes funciones:

- Proporcionan al suelo la cobertura que éste requiere para la SD porque mejoran en el suelo la temperatura, la evaporación y la infiltración del agua.
- Protegen el suelo contra la erosión.
- Reducen la infestación de malezas y el costo de controlarlas.
- Producen un máximo posible de biomasa y aumentan, por tanto, la materia orgánica del suelo.
- Agregan nitrógeno al sistema de producción de arroz reduciendo, por ello, la cantidad de urea requerida por el cultivo.
- Mejoran la estructura del suelo y evitan su compactación.
- Reciclan varios nutrientes importantes para el arroz.
- Reducen la incidencia de enfermedades y de insectos plaga (cuando han sido bien escogidas).
- Añaden diversidad al sistema de producción.

Si se adoptan la agricultura de conservación, la práctica de la mínima labranza y el sistema de siembra directa, disminuirá hasta un nivel muy bajo el sobrelaboreo del suelo. En consecuencia, se reducen la erosión, la compactación y la degradación de ese suelo. Además, se evitan muchas pérdidas de materia orgánica del suelo, así como las emisiones de CO_2 y de otros gases de efecto invernadero debidas al laboreo innecesario.

Agricultura de precisión

En la agricultura tradicional no se aplican los conocimientos que se hayan adquirido sobre la diversidad del suelo, del clima y de otros factores ambientales al manejo de los cultivos; en ella se hace, en realidad, un *manejo generalizado* para un ambiente altamente diverso, pero este enfoque no es eficiente y es poco efectivo. La agricultura basada en la generalización y en los promedios no proporciona una comprensión adecuada del proceso de producción, resulta

costosa y causa impactos ambientales negativos (Blackmore et al., 1995). Ahora bien, es necesario producir alimentos de manera más eficiente y sostenible y mediante operaciones más precisas, es decir, mejorando la competitividad del sector agropecuario. La agricultura de precisión (AP) se apoya, además, en las siguientes razones:

- Las limitaciones que impone el cambio climático.
- La competitividad creciente del mercado agrícola ya globalizado.
- El alto costo de los insumos agrícolas y de los combustibles.
- La necesidad de evitar la degradación de los recursos naturales.

Un ejemplo de la insuficiencia del enfoque generalizador es el manejo de un cultivo basado en un promedio de fertilidad del suelo, porque:

- Las áreas donde el rendimiento es bajo pueden quedar sobre-fertilizadas.
- Las áreas donde el rendimiento es alto pueden quedar menos fertilizadas.
- La aplicación anual de este manejo incrementa la variabilidad del campo, y esto puede reducir la productividad del cultivo.

La agricultura ha llegado, al parecer, al punto en que le conviene iniciar el manejo específico de cada sitio para mejorar la gestión de los cultivos (Espinosa, 2003).

Precisión en el manejo por sitio

La agricultura moderna se está orientando hacia el manejo de precisión. Este enfoque busca optimizar el proceso productivo agrícola partiendo del concepto de variabilidad del agroecosistema. La AP hace uso de la tecnología de la información para que el manejo del suelo y del cultivo se ajusten a la variabilidad presente en el terreno de siembra (Bragachini et al., 2005). Si se desea dar al cultivo (según un principio agronómico reconocido) un manejo 'específico de cada sitio', es decir, el manejo correcto, en el sitio indicado y en el momento oportuno, se recurre a la AP. Ésta se puede definir, por tanto, como la automatización del sitio específico (Bragachini et al., 2005). Junto a la biotecnología, la AP es uno de los cambios más importantes que ha experimentado la agricultura en los últimos años (Bongiovanni [2004]).

La AP puede definirse también (Plant R., citado por Roel, 2005) como la acción de manejar una finca a una escala menor que la superficie de esa finca. En ella, la tecnología y las herramientas del manejo específico de cada sitio logran dos objetivos: manejar un cultivo (el arroz) en una escala menor que el área total de la finca cultivada y, a la vez, aplicar ese manejo a las condiciones extensivas de producción de la finca (Roel, 2005).

Variabilidad en el campo

Los componentes del campo o factores de la producción agrícola (suelo, clima, especies cultivadas) no son uniformes ni constantes. Su variabilidad, que tiene diversas causas, ha sido clasificada como natural, inducida y temporal.

Variabilidad natural
Es la que se debe a los procesos de la naturaleza que actúa a través de los componentes naturales del medio agrícola. Es el caso de los diferentes tipos de suelo, los diversos climas, la topografía variable y la diversidad de especies vegetales y animales del campo.

Variabilidad inducida
Es la que deriva de las prácticas antrópicas realizadas en el campo; por

ejemplo, los diferentes niveles de conservación de los suelos, los diversos tipos e intensidades de compactación del suelo. En ciertos casos, la variabilidad inducida no se diferencia claramente de la natural porque ocurren interacciones complejas entre los procesos naturales y los antrópicos; por ejemplo (Godwin et a1., citado por Leiva, 2003), la fertilidad de un suelo agrícola depende de los procesos de génesis del suelo (variable natural) y del manejo que el agricultor le da al suelo (variable antrópica).

Variabilidad espacial

Es la que ocurre en una finca y aun dentro de un lote o un terreno de una finca; por ejemplo, el contenido diferente de nutrientes de varios suelos, el rendimiento diferente en distintos lotes de un mismo cultivo (Figura 9). Ocurren también cambios en períodos cortos que pueden afectar considerablemente la producción agrícola; por ejemplo, la variación del clima, de la humedad del suelo o del contenido de un nutriente en el suelo durante el desarrollo de un cultivo (Leiva, 2003).

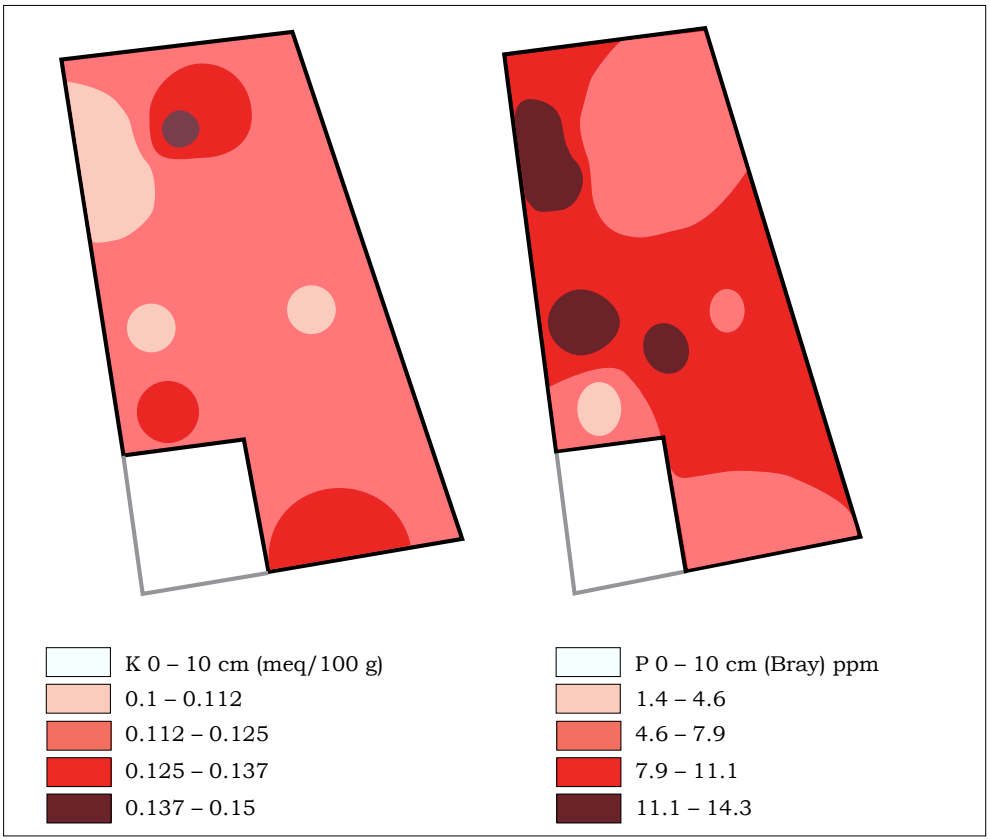


Figura 9. Variabilidad de dos factores del suelo de una finca de 12 ha cultivada con arroz. INIA, Uruguay.

FUENTE: Roel, 2005.

Tecnología de la agricultura de precisión

En los países desarrollados, la AP emplea las herramientas tecnológicas y los procedimientos siguientes:

Sistema de posicionamiento global (SPG)
Es el proceso que establece la posición de un sitio empleando la constelación de satélites en combinación con un equipo de corrección diferencial que mejora la precisión del proceso. El sistema es, sencillamente, un 'ubicador' (o fijador de posición), tanto de personas como de cosechadoras, sembradoras u otras máquinas en el campo.

Sistema de información geográfica (SIG)
Es un programa de computador que recolecta la información y la clasifica, luego la analiza, la presenta como un mapa y la grafica; puede mostrar también datos de producción de un cultivo dándoles una referencia espacial; por ejemplo, las coordenadas de latitud y longitud. Puede considerarse como un sistema que maneja la información con un enfoque geográfico, le hace luego un análisis de capa múltiple, la organiza para hacer posibles su ulterior análisis y su evaluación, y la presenta para que el agricultor tome decisiones sobre ella. Transforma, asimismo, algunos datos en información útil que permita planificar y administrar los recursos de la actividad agrícola.

Seguimiento del rendimiento y construcción de mapas
Esta herramienta es un indicador biológico de la variabilidad de los factores que afectan el rendimiento. Con ella se elabora una base de datos, se verifica la magnitud de un problema y se define la actitud que debe asumirse frente al problema (Espinosa, 2003).

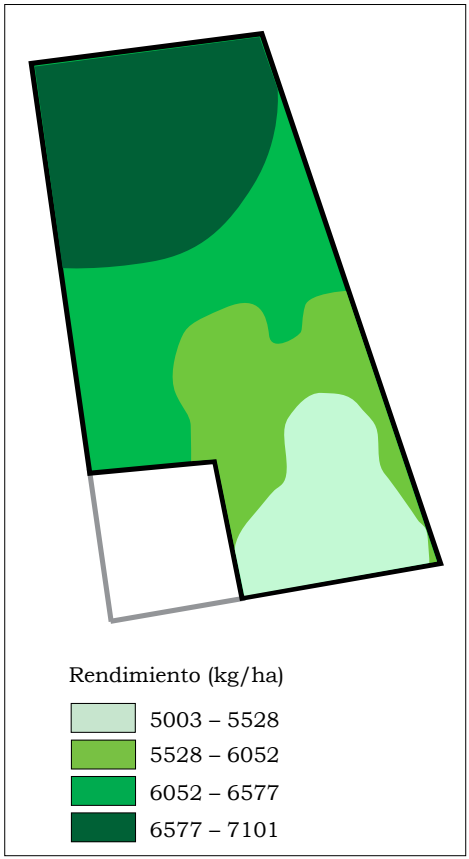


Figura 10. Variabilidad del rendimiento en un lote cultivado con arroz. INIA, Uruguay
FUENTE: Roel, 2005.

En el terreno de la Figura 10, que pertenece a una sola finca, se aprecia un rango de variabilidad espacial del rendimiento que tiene una diferencia de 2000 kg/ha entre los extremos del rango. Estas diferencias se asocian con los mapas de suelos y se analizan mediante un SIG y usando la estadística espacial. La variabilidad espacial del rendimiento de esta finca se debió (Roel, 2005) a la variación de los tipos de suelos (variabilidad natural).

Monitor de rendimiento
El seguimiento anterior se hace con un monitor de rendimiento que mide el rendimiento de pequeñas áreas o sitios de un lote del cultivo y lo registra, medición que hace en forma continua mientras se cosecha el grano. El monitor da además la ubicación de esos sitios, calcula el contenido de humedad y la cantidad de grano producido en cada uno, y registra esa información. Con la ayuda de un programa de computador se construye un mapa en el que se muestra la ubicación de los sitios de cosecha analizados.

La herramienta permite que el productor observe, mientas cosecha sus lotes, la variabilidad del rendimiento del cultivo y que haga, de manera simultánea, observaciones y anotaciones sobre lo que se identifica en el campo. El siguiente paso sería averiguar las diversas causas de la variabilidad del rendimiento de un lote determinado.

En los lotes de escasa variabilidad, el monitor de rendimiento puede dar información útil sobre la mejor dosis de fertilización, el mejor híbrido o la mejor variedad, la mejor densidad de siembra. Así se emplea esta herramienta en el proyecto de AP de la estación INTA Manfredi, en Argentina (Bragachini et al., 2005).

La firma AgLeader, de Estados Unidos, ha desarrollado una herramienta novedosa: un modelo de monitor de rendimiento, denominado Insight, que tiene pantalla activa de 10.4" y elabora un mapa del rendimiento, en color y en tiempo real. Además, puede superponer varias capas de información en una misma pantalla; por ejemplo, un mapa de variedades o híbridos como fondo, y sobre él un mapa de rendimientos mientras se va cosechando el lote al que se hace el seguimiento (o monitoría).

Banderilleo satelital
Esta herramienta es un sistema de guía por GPS para que el equipo siga una trayectoria determinada según el mapa de aplicación de un insumo. Se usa principalmente en las pulverizadoras autopropulsadas.

Procedimientos derivados

La información obtenida con las herramientas anteriores se emplea para ejecutar varios procedimientos agronómicos. El primero es la toma de muestras de suelo.

Muestreo intensivo del suelo
Este procedimiento consiste en tomar muestras representativas de cada unidad de manejo, unidades que dependen del tipo de suelo y de la zona de diferente potencial de rendimiento. Estas muestras se llevan al laboratorio y se interpretan para determinar el factor que limita el rendimiento; luego se toma una decisión sobre la cantidad de nutriente que se agregará, sobre la densidad de siembra y sobre otros aspectos del cultivo (Bongiovanni [2004]).

Fertilización y densidad de siembra variables
El siguiente procedimiento consiste en ajustar la dosis de fertilizante según el mapa de aplicación construido mediante un SIG. Primero se hace uso del GPS para reconocer la ubicación del equipo en el lote que se sembrará. Una computadora introduce la información obtenida en el controlador del equipo para hacer variar, sobre la marcha, la dosis recomendada. Lo ideal es tener maquinaria que entregue una dosis variable bajo prescripción, porque con ella se puede sembrar o fertilizar en cualquier sentido, ya que esa maquinaria cuenta con el GPS que le indica no sólo el sitio del lote donde está ubicada mientras siembra y fertiliza, sino también

la dosis de fertilizante y la densidad de siembra para cada sitio (Bragachini et al., 2005).

Si el equipo no puede entregar una dosis variable automáticamente, la alternativa es la dosis variable manual o la paralelización de las zonas (o ambientes) del terreno que se manejan. Este procedimiento puede ejecutarse sólo en los lotes en que es posible encerrar la variabilidad dentro de líneas casi rectas; hay que tomar, por tanto, la precaución de marcarle al tractorista los puntos en que debe cambiar la relación de marcha en la caja o en el dial de la abonadora y de la sembradora, para que dosifique según lo que se necesita en cada zona o ambiente.

Unidades de manejo

Cuando el agricultor no dispone de maquinaria, lo más recomendable es que divida el predio o el campo en unidades de manejo más pequeñas, que sean más homogéneas que el área total. Estas unidades, que unos denominan de manejo ambiental, otros de manejo agronómico y otros simplemente unidades de manejo, presentan una relativa homogeneidad de clima, de suelo, de topografía, de hidrología (nivel freático) y de la variedad sembrada (o que se sembrará). Hay que procurar que estas unidades sean tan cuadradas como sea posible, porque esta forma facilita la logística de las operaciones de campo, el seguimiento ('monitoreo') de la cosecha y las labores de fertilización y de siembra. Estas unidades pueden estar divididas por canales y por caminos, y pueden tener otras obras de infraestructura (Spaans et al., 2007).

En la práctica, los agricultores diferencian las zonas más fértiles y las más pedregosas o arenosas de su predio; sin embargo, un enfoque integrador, en el que se conformen unidades de manejo agrícola homogéneo, generaría para ellos resultados más confiables (Peña, 2006, citado por Peña, 2007).

Labranza por sitio específico

La AP se ha enfocado hacia la fertilización en dosis variables; pueden hacerse, por tanto, diferentes tipos de labranza del suelo en áreas que tengan características físicas significativamente homogéneas. El sistema tradicional de labranza ha empleado un esquema único de laboreo del suelo para la totalidad de una explotación agrícola.

La estación experimental Santa Rosa, en Villavicencio, Colombia, está dividida en unidades de manejo ambiental —definidas según la textura del suelo, la topografía y la historia de manejo— en las que se hace un manejo específico de cada sitio para la labranza.

Pasos

Para establecer el manejo mencionado se dieron los siguientes pasos:

- **Primer paso: diagnóstico del suelo.** En 1999 se evaluó la condición física del suelo de la estación midiendo parámetros físicos como la densidad aparente (que varió entre 1.14 y 1.56 g/cm^3), la penetrabilidad, la humedad gravimétrica, la resistencia mecánica y la textura; con ellos se midieron también algunos parámetros dependientes, como la porosidad total y la conductividad hidráulica. Con estos datos se hizo un análisis integral que permitió explicar los procesos físicos que ocurrían en el continuo suelo-planta, y conocer el contenido de materia orgánica del suelo.
- **Segundo paso: análisis de limitantes.** Se interpretaron los resultados de laboratorio obtenidos de las medidas anteriores para hallar los factores limitativos del manejo.

- **Tercer paso: sistema de labranza.** Una vez decidido el sistema de labranza, se definieron las prácticas de manejo, el tipo de implemento que se usaría y la profundidad a que se prepararía el suelo de cada unidad de manejo.
- **Cuarto paso: manejo del suelo.** Se ponen en práctica (se 'implementan') las prácticas de manejo del suelo en cada unidad de manejo, teniendo en cuenta tres aspectos: la condición climática, la humedad del suelo y la consistencia friable del suelo.
- **Quinto paso: seguimiento y evaluación.** En este paso se hace seguimiento a las condiciones del suelo, y se evalúan luego estas condiciones, el rendimiento y la relación costo:beneficio en cada unidad de manejo.

Estrategias

Comprobada la variabilidad de los factores físicos del suelo (densidad aparente, penetrabilidad, porosidad) y una vez analizadas las mediciones de esos factores, se ejecutó la estrategia de manejo de cada lote. Una de las principales causas de esa variabilidad fue el manejo dado a los lotes antes de 1999. Hubo mecanización intensiva que generó compactación del suelo y aumento de su densidad aparente en los lotes más trabajados: en el lote10, por ejemplo, llegó hasta 1.5 g/cm^3.

Las unidades de manejo en que hay compactación del suelo se recuperan con la estrategia de la capa arable. Se planificó una labranza vertical con cinceles según la profundidad de la capa compactada y según otras condiciones del lote; se hizo luego una rotación de leguminosas, arroz, soya, millo forrajero, crotalaria y fríjol mungo para mejorar las condiciones físicas y biológicas de los suelos, y se aplicaron abonos para mantener las condiciones mejoradas.

Resultado. En las unidades de manejo 5 y 10 se logró un mejoramiento considerable de sus condiciones física y biológica; estas unidades reciben la mínima labranza durante el primer semestre, y una siembra directa del arroz durante el segundo semestre.

Unidad 10

Se presenta aquí, como ejemplo de manejo, el estudio y las prácticas realizados en la Unidad 10 de la estación Santa Rosa. Su textura es franco-arcillosa. A 20 cm de profundidad, el manejo convencional, en 1999, desarrolló en el suelo una resistencia mecánica a la penetración de 25 kg/cm^2; en cambio, con el manejo específico para cada sitio se obtuvo, en el 2008, un valor de 7.5 kg/cm^2 para ese parámetro. Se aplicaron aquí los principios de la agricultura de conservación.

Esta unidad se sembró con una variedad certificada de arroz, la Fedearroz-369, recomendada para la zona de Santa Rosa (secano favorecido); se aplicó un plan de nutrición según los requerimientos específicos de la variedad (cantidad y oportunidad de la aplicación), y se tuvieron en cuenta las condiciones química y física del suelo. El terreno se manejó con mínima labranza haciendo un solo pase de escardillos con riel; la siembra se hizo con una sembradora Case de grano fino, que siembra y fertiliza simultáneamente. Se obtuvo un rendimiento de 8.3 t/ha; en esas mismas condiciones, otra variedad de arroz dio solamente 4.8 t/ha.

Los resultados obtenidos en esta Unidad 10, y en toda la estación, son los siguientes:

- Una reducción del 80% en los costos de preparación del suelo de la unidad y del 43% en los de preparación de toda la estación experimental.

- Una disminución del valor de penetrabilidad del suelo (lo que mejora esa condición física).
- Una reversión de la pérdida de materia orgánica: de un mínimo de 1.7% cuatro años antes de este manejo se pasó a 2.1%.
- Una reducción en el consumo de combustible: se ahorraron cerca de 4.5 galones de ACPM por hectárea.
- Una disminución de la erosión hídrica, que estaba agotando la tierra.
- Una disminución de pases de maquinaria agrícola en la labranza (cinco en 1999 y uno solo en el 2008), lo que redujo mucho la compactación del suelo.

En general, en las unidades en que se aplicaron las prácticas más conservacionistas (mínima labranza en el primer semestre y SD del arroz en el segundo semestre), disminuyeron los sólidos en suspensión en las aguas de los canales de riego (que vierten a los caños) y, en consecuencia, se redujo la sedimentación en esos canales. Antes de 1999, año del diagnóstico inicial de los lotes, era necesario contratar trabajadores para sacar el suelo de los canales y drenajes, en los que a veces debían cavar en profundidad.

Beneficios para el agricultor

Del manejo por sitio
Cuando se lleva a la práctica el manejo de labranza específico para cada sitio, aplicando la tecnología de capa arable y los principios de la AC, se obtienen los siguientes beneficios:

- Reducción del número de pases de maquinaria, lo que evita la compactación del suelo por tránsito excesivo de las máquinas y por pisoteo.
- Reducción en el uso de combustibles y en el consumo de energía para la siembra del cultivo.
- Reducción del costo de preparación del suelo.
- Disminución de la contaminación del agua porque habrá en ella menos sólidos (partículas de suelo) en suspensión.
- Protección del suelo contra la erosión.
- Mejor equilibrio de la materia orgánica del suelo.
- Uso óptimo de los recursos agrícolas.
- Producción agrícola más eficiente y más sostenible.
- Incremento en el rendimiento del cultivo.

El aumento en rendimiento no se debe exclusivamente a la labranza practicada en el manejo específico por sitio, sino a una integración de este manejo y de la variedad de arroz seleccionada. En los ensayos de AP hechos en Santa Rosa, se escogió la variedad F-369, ya mencionada, que está certificada, ha sido recomendada para la zona de la estación experimental y tiene un alto potencial de rendimiento; se cumplió además con el plan de nutrición específico de la variedad, se aplicaron oportunamente los fertilizantes e insumos, y se eligió la época adecuada de siembra según las condiciones del clima.

El análisis de beneficio:costo de este manejo es menos favorable que el convencional porque debe incluir el costo de los análisis de suelo adicionales.

De otros aspectos de la AP
Cuando se pone en práctica la AP en su conjunto, se obtienen tres clases de beneficios: económicos, ecológicos y técnicos. Por ejemplo:

- El ahorro potencial en insumos debido a aplicaciones más precisas y a un mejor desarrollo del cultivo representa una ganancia económica (Crooks, Y., citado por Leiva, 2003).
- Este beneficio económico podría ser mayor si se contratan los servicios

agrícolas de compañías que operen en la zona en que se cultiva.

- Un ensayo hecho en dos fincas de Inglaterra (Leiva, 2003) indicó que el beneficio económico de la AP, derivado de la aplicación de agroquímicos, es una función del ahorro de fertilizantes y de plaguicidas y del aumento en el rendimiento del cultivo, dado que se hacen aplicaciones más precisas y mejores de esos insumos. La rentabilidad más alta se halló en la finca de mayor tamaño, lo que indica una economía de escala por el uso de las tecnologías de la AP.
- Hay mayor beneficio, tanto económico como técnico, cuanto mayor sea la variabilidad de la finca en que se aplican los principios de la AP, y éstos resultan entonces más justificables.
- Se obtendrán muchos beneficios ecológicos, económicos y técnicos si el proceso de ejecución de la AP se inicia con la comprensión del concepto de AP y avanza paulatinamente hacia la aplicación de las tecnologías que favorezcan esa ejecución (Figura 11). Se propone

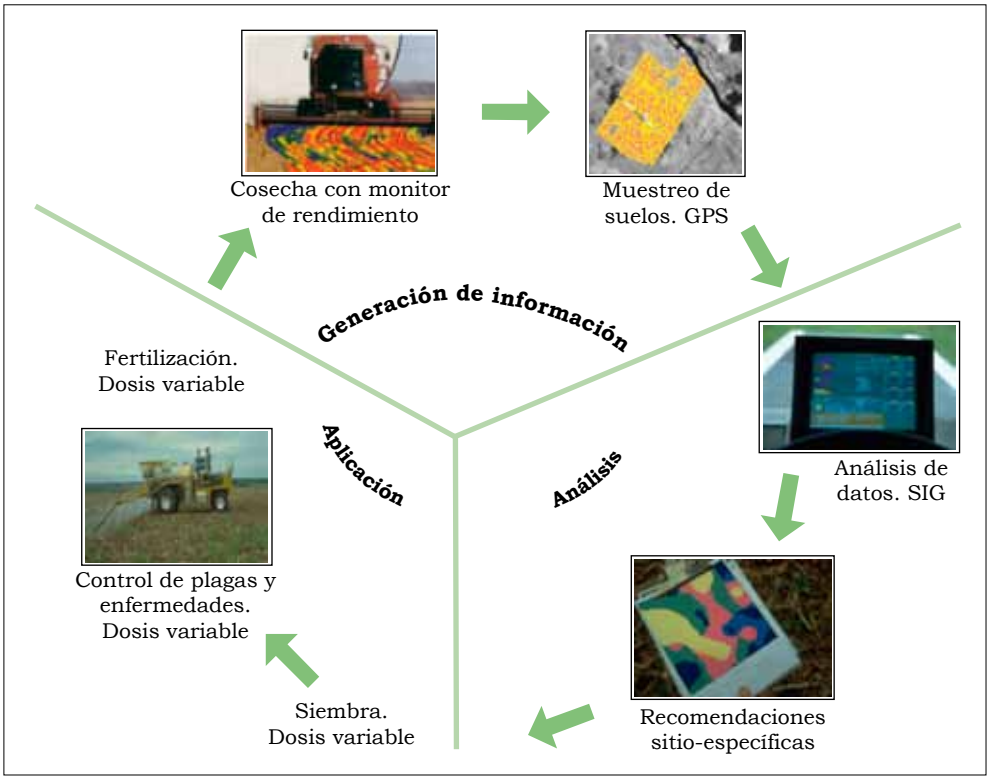


Figura 11. Fases del proceso de establecimiento de la agricultura de precisión, aplicables tanto a nivel regional como local.

entonces la siguiente secuencia de etapas (Leiva, 2003):

- medir la variabilidad de los parámetros clave del sistema y evaluarla;
- establecer las causas posibles de esa variabilidad y valorarlas;
- corregir los errores evidentes que se cometen en el proceso productivo;
- decidir las estrategias de manejo de la producción del cultivo;
- valorar diferentes alternativas tecnológicas para la estrategia elegida; la valoración incluye el análisis de la relación beneficio:costo en el uso de las tecnologías;
- adoptar, finalmente, un determinado nivel tecnológico de AP;
- hacer seguimiento (monitoría) de la AP adoptada, y evaluarla.

Agricultura de precisión en países no industrializados

La AP es todavía incipiente en los países en vías de desarrollo. Una de sus limitaciones es la necesidad de un proceso de adaptación a las condiciones particulares de cada país.

- El INTA de Argentina, por ejemplo, desarrolla su propio proyecto de agricultura de precisión, cuyos líderes (Bragachini y Méndez) han logrado importantes avances en el seguimiento del rendimiento, en la aplicación de dosis variable de agroquímicos, en la siembra de densidad variable, y en el diseño de herramientas tecnológicas adaptadas a las condiciones del país.
- En el cono sur del continente hay varios proyectos. En Brasil, Embrapa ejecuta un proyecto de AP con la Universidad de São Paulo. En Paraguay y en Uruguay hay iniciativas en marcha para manejar el cultivo del arroz con AP.
- El manejo específico para cada sitio puede automatizarse mediante tecnologías de la AP en los países en desarrollo (Godwin et al., 2001), aunque al principio se aplicará solamente a las grandes explotaciones mecanizadas; cuando baje el costo de la tecnología, ese manejo se difundirá progresivamente a las explotaciones de menor tamaño.
- Las explotaciones agrícolas pequeñas de todo el mundo pueden hacer uso de sus conocimientos sobre el manejo específico para cada sitio sin necesidad de aplicar procesos de automatización. En ellas se emplea, generalmente, la mano de obra familiar y los productores pueden observar personalmente la variabilidad espacial del suelo, de las plagas y del rendimiento de su cultivo. Estudios hechos en la Universidad de Purdue, en Estados Unidos, indican que es difícil justificar económicamente la inversión en equipamiento de AP para un campo chico.
- En Colombia se hacen experiencias de AP en caña de azúcar con Cenicaña, en suelos para palma africana con Cenipalma, y en banano. Aunque hay algunas investigaciones sobre AP en la Universidad Nacional de Colombia, todavía falta mucho para adaptar las metodologías y las tecnologías de la AP, tanto en equipos como en programas de computador, al sistema de cultivo del arroz (de secano favorecido o no favorecido) y a los ecosistemas aptos para este cultivo.

Referencias bibliográficas

Amézquita, E. 1998a. Hacia la sostenibilidad de los suelos en los Llanos Orientales. In: Memorias del Noveno Congreso Colombiano de la Ciencia del Suelo celebrado en Paipa, Colombia, del 21 al 24 de octubre de 2000. Corpoica/CIAT, Cali, Colombia.

Amézquita, E. 1998b. Propiedades físicas de los suelos de los Llanos Orientales y sus requerimientos de labranza. In: Romero G.; Aristizábal, D.; Jaramillo, C. (eds.). Memorias del Encuentro Nacional de Labranza de Conservación reunido en Villavicencio, Colombia, en 1998. p. 145-174.

Amézquita C., E.; Molina L., D.L.; Chávez, L.F. 2000. La construcción de una capa arable: Práctica clave para la agricultura sostenible en los suelos de la Altillanura colombiana. In: Memorias del Segundo Seminario de Agrociencia y Tecnología Siglo XXI para la Orinoquia Colombiana, reunido en Villavicencio del 23 al 25 de agosto de 2000. Corpoica/Pronatta/CIAT, Villavicencio, Colombia.

Amézquita, E.; Chávez, L.F.; Bernal, J.H. 2002. Construcción de una capa arable en suelos pobres: Conceptos esenciales aplicados en la Altillanura. Colciencias/CIAT/ Corpoica, Bogotá, Colombia.

Amézquita C., E.; Hoyos G., P.; Molina L., D.L.; Rao, I.M.; Sanz S., J.I.; Vera, R.B. 2003. Construcción de capas arables productivas en suelos de la Altillanura. In: Presentaciones técnicas [en línea) del Seminario-Taller Internacional de Mejoramiento de Arroz de Secano para América Latina y el Caribe celebrado en Villavicencio, Colombia, en 2003. Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT) y Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement (CIRAD), Cali, Colombia. p. 1-15. Disponible también en http://webapp.ciat.cgiar.org/riceweb/memorias/d_molina.pdf

Amézquita C., E.; Hoyos G., P.; Molina L., D.L. 2004. Estrategias para la construcción de capas arables productivas en los suelos de la Altillanura colombiana. Informe final CIAT-Pronatta. Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), Cali, Colombia.

Blackmore, B.S.; Wheeler, P.N.; Morris, J.; Morris, R.M.; Jones, R.J.A. 1995. The role of precision farming in sustainable agriculture: A European perspective. In: Memorias de la Precision Agriculture Conference celebrada en Madison, WI, EE.UU., en 1995. p. 777-793.

Bongiovanni, R. [2004]. Rentabilidad de la agricultura de precisión. Presentado a la Revista Agromercado. INTA, Agricultura de precisión, Argentina. Disponible también en: www.fiagro.org.sv/archivos/0/436.pdf

Bragachini, M.; Méndez, A.; Scaramuzza, F.; Proietti, F. 2005. Soja: Eficiencia de cosecha y poscosecha de granos. Manual técnico no. 3. Proyecto Agricultura de Precisión INTA-Manfredi. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA-PRECOP), Buenos Aires, Argentina. 146 p.

Derpsch, R. 2003. Evolución de la agricultura de conservación. Memorias del Segundo Encuentro Nacional de Agricultura de Conservación. Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo (SCCS), Regional Llanos Orientales. Villavicencio, Colombia.

Espinosa, J. 2003. Agricultura por sitio específico. In: Memorias del Segundo Encuentro Nacional de Agricultura de Conservación. Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo (SCCS), Regional Llanos Orientales, Villavicencio, Colombia. p. 47-51.

Godwin, R.J.; Earl., R.; Taylor, J.C.; Wood, G.A.; Bradley, R.I.; Welsch, J.P.; Richard, T.; Blackmore, S. 2001. Precision farming of cereals: A five year experiment to develop management guidelines. Project Report no. 267. Home-Grown Cereals Authority (HGCA) y Cranfield University, Reino Unido.

Hoyos G., P.; Amézquita C., E.; Molina L., D. L. 2004. Mejoramiento de las características del suelo aplicando el concepto de 'creación de una capa arable' en dos suelos de la Altillanura plana del departamento del Meta, Colombia. Suelos Ecuatoriales (Colombia) 34(2):93-97.

Junk, W. 1993. Wetlands of tropical South America. In: Whigham, D.; Dykyjova, D. (eds.). Wetlands of the world; I: Inventory, ecology and management. Kluwer, Boston, MS, EE.UU. p. 679-739.

Leiva, F. 2003. La agricultura de precisión: una producción más sostenible y competitiva con visión futurista. In: Memorias del VIII Congreso de la Sociedad Colombiana de Fitomejoramiento y Producción de Cultivos celebrado en julio de 2003. Disponible también en: www.reddeagriculturaprecision.unal.edu.co/doc/Publicaciones/Paper%20Agriprecision-Simposio-Leiva.pdf

Molina L., D.L.; Amézquita C., E.; Hoyos G., P. 2003. Construcción de capas arables en suelos Oxisoles de la Altillanura colombiana. Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), Cali, Colombia. 5 p. Disponible también en: www.bvsde.paho.org/bvsacd/cd29/capas.pdf

Peña, A.J.; Rubiano, Y.; Amézquita, E.; Bernal, J.H.; Montoya, L.; Moreno, J.L. 2007. Variabilidad espacial de los atributos químicos y físicos de los suelos de la Altillanura en la Estación Sabanas-Taluma. In: Caicedo, S.; Salamanca, C.R., Jaramillo, C.A.; Romero, G. (comps.). Futuro agroempresarial de la agricultura tropical. Memorias del Tercer Encuentro de Agricultura de Conservación reunido en Villavicencio, Colombia, del 6 al 8 de junio de 2007. Universidad Nacional de Colombia/Corpoica/CIAT/UNILLANOS, Villavicencio, Colombia.

Rivas R., L.; Hoyos G., P.; Amézquita C., E.; Molina L., D.L. 2004. Manejo y uso de los suelos de la Altillanura colombiana: Análisis económico de una estrategia para su conservación y mejoramiento [en línea]. Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), Cali, Colombia. 43 p. Disponible también en: http://ciat-library.ciat.cgiar.org/Articulos_Ciat/degradacion_capa_arable.pdf

Roel, A. 2005. Agricultura de precisión: Una herramienta para innovar. Revista INIA (Uruguay) 3:35-46.

Spaans, E.; González, D.; Cortés, G. 2007. Agricultura de precisión. In: Caicedo, S.; Salamanca, C.R.; Jaramillo, C.; Romero, G. (comps.). Memorias del Tercer Encuentro Nacional de Agricultura de Conservación reunido en Villavicencio del 6 al 8 de junio de 2007. Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo (SCCS), Regional Llanos Orientales, Villavicencio, Colombia.

Williams, M. 1990. Understanding wetlands. In: Williams, M. (ed.). A threatened landscape. Blackwell, Londres. p. 1-41.

Yule, L.J.; Cain, P.J.; Evans. E.J.; Venus, C. 1996. A spatial inventory approach to farm planning. Computers and Electronics in Agriculture 14:151-161.

Capítulo 17

Nutrición mineral del arroz

Sara Mejía de Tafur
Juan Carlos Menjívar

Contenido

	Página
Resumen	306
Abstract	307
Introducción	307
Solución del suelo	308
Funciones y distribución de los elementos esenciales en la planta de arroz	310
Nitrógeno: funciones importantes	311
Fósforo: funciones importantes	316
Potasio: funciones importantes	318
Calcio: funciones importantes	320
Magnesio: funciones importantes	320
Azufre: funciones importantes	321
Silicio: importancia en la planta	323
Hierro: importancia en la planta	324
Zinc: importancia en la planta	327
Cobre: importancia en la planta	328
Manganeso: importancia en la planta	329
Molibdeno: importancia en la planta	330
Boro: importancia en la planta	330
Relaciones entre los nutrientes	332
Referencias bibliográficas	333

Resumen

Se revisan en detalle los diversos aspectos relacionados con la nutrición mineral del arroz, con énfasis en las funciones y la distribución de los elementos esenciales para la planta. Estos elementos son: nitrógeno, fósforo, potasio, calcio, magnesio, azufre, silicio, hierro, zinc, cobre, manganeso, molibdeno y boro. Se señala que en el cultivo del arroz (y en todos los cultivos) una nutrición adecuada implica un equilibrio en las cantidades de los diferentes nutrientes que se aplican al suelo y que tomará la planta. Un desequilibrio en esta relación de nutrientes puede ser causa directa de la presencia de insectos plaga y de la susceptibilidad de las plantas a las enfermedades, lo que afectará, sin duda, el rendimiento final del cultivo.

Abstract

Mineral nutrition of rice

Several aspects related to the mineral nutrition of rice are reviewed in detail, with emphasis on the functions and distribution of essential plant elements (nitrogen, phosphorus, potassium, calcium, magnesium, sulfur, silicon, iron, zinc, copper, manganese, molybdenum, and boron). In rice, as in all crops, an adequate nutrition implies a balance in the amounts of the different nutrients applied to the soil and absorbed by the plant. An imbalance in this nutrient ratio can directly cause the presence of insect pests and disease susceptibility in plants, which will undoubtedly affect final crop yield.

Introducción

Para alcanzar altos rendimientos de manera sostenible y, además, amigable con el ambiente, es necesario conocer la fisiología del arroz y sus requerimientos nutricionales, en particular, así como las condiciones del suelo y del clima donde se establecerá el cultivo. El suelo casi nunca contiene la cantidad óptima, en el equilibrio adecuado, de todos los nutrientes requeridos por las plantas; si no se hacen, por tanto, las enmiendas apropiadas, las plantas compensarían en crecimiento, desarrollo y productividad esa ausencia. Plantas sanas y vigorosas y cultivos de alto rendimiento son el resultado del manejo integral del cultivo, que implica, entre otros requisitos, un nivel adecuado en el medio de crecimiento de cada elemento nutricional para satisfacer las necesidades de las plantas.

Hasta el momento se han encontrado 17 elementos esenciales para la nutrición de las plantas superiores; de ellos, el carbono (C), el hidrógeno (H) y el oxígeno (O) representan del 90% al 95% de la materia seca vegetal (Cuadro 1). La planta toma el C del CO_2 del aire por los estomas de las hojas, y lo fija mediante la enzima RuBisCo (ribulosa-1-5-bisfosfato carboxilasa-oxigenasa); el H es tomado del agua, y el O del aire y del agua. La asimilación de estos elementos se trata ampliamente en el estudio de la fotosíntesis.

Los 14 elementos restantes, tema de este capítulo, son tomados principalmente por las raíces y representan más o menos el 4% de la biomasa acumulada (Cuadro 1). Cada uno tiene funciones específicas, ya sea como componente estructural o del metabolismo, y se clasifican según la cantidad que requiera la planta, en elementos mayores (macronutrientes) y elementos menores (micronutrientes); ésta es la clasificación más empleada. Según sus propiedades fisicoquímicas, se clasifican en metales (K, Ca, Mg, Fe, Mn, Zn, Cu, Mo y Ni) y no metales (N, S, P, B y Cl). Estos elementos cumplen funciones importantes en los procesos metabólicos vegetales, son absorbidos del suelo en forma inorgánica y están disponibles como iones disueltos en el medio acuoso del suelo. La materia insoluble del suelo, como el cuarzo, la arcilla y el humus, pueden almacenar los iones, pero no son esenciales para el crecimiento y desarrollo de las plantas.

La nutrición de las plantas está regida por la ley del mínimo y por los criterios de esencialidad. La ley del mínimo dice que el nutriente que limita la producción es el que se encuentra menos disponible, aunque los demás estén en cantidades suficientes. Se representa por un barril de madera constituido por varias tablillas (o dovelas) que se desborda por la tablilla más corta; la ley se ha reformulado, sin embargo, para incluir los factores ambientales que influyen en el crecimiento y desarrollo de las plantas.

Cuadro 1. Contenido promedio de elementos nutricionales de las especies vegetales cultivadas.

Elemento	Ión o compuesto en que es absorbido	Concentración en materia seca (%)	Concentración en materia seca (mg/kg)
H	H_2O	6	
C	CO_2	45	
O	O_2, H_2O	45	
N	NH_4^+, NO_3^-	1.5	
K	K^+	1.0	
Ca	Ca^{2+}	0.5	
Mg	Mg^{2+}	0.2	
P	HPO_4^{2-} , $H_2PO_4^-$	0.2	
S	$SO_4^=$	0.1	
Cl	Cl^{4-}		100
B	$BO_3^=$, $B_4O_7^=$		20
Fe	Fe^{4+}. Fe^{3+}		100
Mn	Mn^{2+}		50
Zn	Zn^{2+}		20
Cu	Cu^+, Cu^{2+}		6
Mo	$MoO_4^=$		0.1
Ni	Ni^{2+}		~0.1

FUENTES: Ascon Bieto y Talon, 2000; Navarro, 2000; Marschner, 1996; Mohr y Schopfer, 1995; Salisbury y Ross, 1994; 2000.

Un elemento es esencial en la nutrición vegetal si cumple una de tres condiciones:

- La planta no puede completar el ciclo de vida sin ese elemento.
- El elemento es un componente irremplazable.
- Es un elemento estructural de órganos y tejidos o de enzimas, y cumple funciones en la actividad enzimática.

Algunos minerales se consideran *benéficos,* ya que no cumplen con los criterios de esencialidad pero estimulan el crecimiento y la productividad de algunas especies. Por ejemplo, el Si que se acumula en las paredes celulares de gramíneas como el arroz y la caña de azúcar. Otros elementos benéficos son el Co, el Na, el Se y el Al.

Solución del suelo

El suelo es un sistema dinámico desde el punto de vista de la fertilidad y la productividad; en él se presentan interacciones con las plantas, el agua y la atmósfera. Está compuesto por las cuatro fases siguientes:

- **Fase gaseosa.** Corresponde al aire que contiene el espacio poroso.
- **Fase sólida.** Es el material originario ('parental') que, mediante la meteorización, contribuye a la formación del suelo.
- **Fase líquida.** Es la solución del suelo, que está conformada por agua con iones libres o en solución provenientes de la fase sólida, los cuales se incorporan al agua mediante procesos de solubilización; esta fase, que ocupa parte del espacio poroso del suelo, sirve para que los

nutrientes puedan entregarse a las raíces de las plantas.
- **Fase orgánica.** Es la que comprende la materia orgánica del suelo.

El suelo ideal tendría, en volumen, 25% de aire, 45% de sólidos, 25% de solución y 5% de materia orgánica.

La solución del suelo (fase líquida) es, sencillamente, una disolución de solutos de naturaleza orgánica e inorgánica en agua, que están disponibles para las plantas; las plantas sólo pueden extraer los nutrientes que necesitan para su desarrollo si están disueltos en agua. Aunque este concepto es sencillo, debe entenderse muy bien para poder manejar adecuadamente un programa de nutrición mineral. El Cuadro 2 muestra los elementos y las sustancias cuya interacción influye en la calidad de esa solución y cuya cantidad varía según el tipo de suelo y el manejo que éste reciba; ambos aspectos afectan, sin duda, la nutrición de los cultivos.

La solución del suelo tiene una dinámica importante y relativamente compleja puesto que en ella interactúan gran cantidad de elementos y sustancias; es preciso entender este fenómeno al momento de recomendar un plan de fertilización para un cultivo. Cuando se aplica un elemento al suelo, ocurren reacciones de adsorción, de intercambio, de fijación, de precipitación o de inmovilización, entre otras, que pueden impedir que la planta tome el elemento. Puede ocurrir también lo contrario, es decir, que el elemento reaccione con otras sustancias y sea absorbido fácilmente por la planta. De este modo, muchos nutrientes de la solución del suelo se pierden por lixiviación y otros se inmovilizan cuando entran a formar parte de los compuestos insolubles que no pueden tomar las plantas.

En ocasiones, la concentración de iones en la solución del suelo no se ajusta a los requerimientos de las plantas: puede ser alta para nutrientes minerales no requeridos y muy baja para los necesarios. Las plantas tienen, por ello, mecanismos de selección de iones, esto es, algunos elementos son discriminados o tomados en menor cantidad; tienen

Cuadro 2. Composición típica de la solución del suelo, que contiene componentes orgánicos e inorgánicos.

Componente	Categoría química	En concentración > 10^{-4}–10^{-2} mol/L	En concentración < 10^{-6}–10^{-4} mol/L	Otros a < 10^{-6} mol/L
Inorgánico	cationes	Ca^{2+} Mg^{2+} Na+ K+	Fe^{2+} Mn^{2+} Zn^{2+} Cu^{2+} NH^{4+} Al^{3+}	Cr^{3+} Ni^{2+} Cd^{2+} Pb^{2+}
	aniones	HCO_3^- Cl^- NO_3^- SO_4^{-2}	$H_2PO_4^-$ F^- HS^-	CrO_4^{2-} $HMoO_4$
	neutros	$Si(OH)_4^0$	$B(OH)_3^0$	
Componente	Origen	En concentración > 10^{-5}–10^{-3} mol/L		En concentración < 10^{-5} mol/L
Orgánico	natural	ácidos carboxílicos, azúcares simples, aminoácidos		carbohidratos, proteínas, alcoholes, fenoles, sulfhidrilos
	antrópico			fungicidas, herbicidas, insecticidas, hidrocarburos, surfactantes, solventes

FUENTE: Wolt, 1994 (citado por Cadena, 2003).

también mecanismos de acumulación de iones requeridos. Estas características dependen del genotipo de la planta, razón por la cual algunas especies se adaptan mejor a determinadas condiciones de suelo.

Funciones y distribución de los elementos esenciales en la planta de arroz

Los nutrientes minerales esenciales cumplen diferentes funciones en la planta y su requerimiento varía según la etapa de desarrollo del cultivo. Los Cuadros 3 y 4 muestran los requerimientos nutricionales del arroz en el tejido foliar en diferentes etapas fenológicas del cultivo. Estas diferencias explican la dinámica de los elementos en las plantas y su influencia en el crecimiento, en el desarrollo y en el rendimiento de éstas. Las funciones de los elementos nutritivos se clasifican en cuatro grandes categorías (Clavijo-Porras, 1994):

- Constitución de estructuras orgánicas.
- Activación de reacciones enzimáticas.
- Almacenamiento y transporte de energía.
- Transporte de cargas y osmorregulación.

El rendimiento de un cultivo como el arroz depende de los siguientes factores:

- Genotipo o variedad sembrada.
- Condiciones ambientales, principalmente temperatura y radiación solar.
- Suministro adecuado de agua.
- Disponibilidad de nutrientes.

La nutrición de las plantas es un factor de producción importante. Por consiguiente, su manejo mediante programas de fertilización debe ser acertado y debe basarse en el conocimiento de la fisiología de las plantas específicas y de las características del suelo donde se establecerá el cultivo. Estos programas requieren, generalmente, la aplicación de agroquímicos que interactúan con la dinámica del suelo, ya sea en beneficio o en perjuicio de la cosecha, del suelo y del ambiente. Los abonos o fertilizantes deben aplicarse en el momento oportuno

Cuadro 3. Concentración de nutrientes en el tejido foliar de la plántula de arroz (plantas de altura mayor que 30 cm).

Elemento	Niveles de concentración			
	Unidad	Bajo	Suficiente	Alto
N	%	< 2.5	2.5–4.0	> 4.0
P	%	< 0.1	0.1–0.2	> 0.2
K	%	< 1.0	1–2.5	> 2.5
Ca	%	< 0.15	0.15–0.3	> 0.3
Mg	%	< 0.12	0.15–0.3	> 0.3
S	%	< 0.15	0.15–0.25	> 0.25
B	mg/kg	< 5	5–25	> 25
Mn	mg/kg	< 20	20–600	> 600
Fe	mg/kg	< 70	70–300	> 300
Cu	mg/kg	< 6	6–25	> 25
Zn	mg/kg	< 15	15–50	> 50
Mo	mg/kg	< 0.1	0.5–2	

Cuadro 4. Concentración de nutrientes en el tejido foliar de la planta de arroz en la etapa que va del macollamiento al inicio del primordio.

Elemento	Niveles de concentración			
	Unidad	Bajo	Suficiente	Alto
N	%	< 2.5	2.5–3.5	> 3.5
P	%	< 0.1	0.1–0.2	> 0.2
K	%	< 1.0	1–2.2	> 2.2
Ca	%	< 0.2	0.2–0.4	> 0.4
Mg	%	< 0.12	0.17–0.3	> 0.3
S	%	< 0.2	0.2–0.5	> 0.5
B	mg/kg	< 4	4–25	> 25
Mn	mg/kg	< 30	30–600	> 600
Fe	mg/kg	< 70	70–300	> 300
Cu	mg/kg	< 5	5–20	> 20
Zn	mg/kg	< 20	20–50	> 50
Mo	mg/kg	< 0.1	0.5–2	

y en dosis equilibradas; muchas veces, el cultivador aplica cantidades altas de fertilizantes, otras veces emplea dosis bajas respecto a la necesidad del cultivo y a las condiciones del suelo, causando así perjuicios ambientales y económicos.

En arroz, el rendimiento de grano es también una función de la arquitectura de la planta, es decir, del número de panículas por unidad de área y del número de espiguillas por panícula; las panículas, a su vez, dependen del número de hijos efectivos formados en la etapa de macollamiento, y las espiguillas dependen del buen desarrollo de las panículas (Perdomo et al., 1985). En varias estructuras de la planta (hojas y panículas) se sintetizan los compuestos que la planta usará luego en procesos complejos dirigidos a la obtención de un buen rendimiento. Esta síntesis ocurre gracias a la presencia de los nutrientes minerales considerados esenciales, que fueron absorbidos por la planta en las diferentes etapas de su desarrollo. En este capítulo se presentan las funciones que desempeña en la planta cada uno de dichos nutrientes.

Nitrógeno: funciones importantes

El nitrógeno (N) es el cuarto elemento en importancia en la planta por su concentración en los tejidos vegetales; lo superan, en orden ascendente, el H, el C y el O. Es un elemento muy dinámico y móvil, por lo que su manejo agronómico es complicado.

En aminoácidos y en proteínas

La importancia grande del N radica en su participación en la estructura de las *proteínas* de las plantas. Una proteína está formada por cadenas de aminoácidos caracterizados por un grupo amino (NH_2^-), constituido por N e H; se calcula que el N representa cerca del 18% del peso total de las proteínas de una planta. Las proteínas cumplen diferentes funciones en las plantas: una estructural (paredes, membranas), otra constitutivo-estructural (los ribosomas), otra de transporte (los citocromos) y otra de almacenamiento (Navarro, 2000).

Otra función importante del N es su participación en la estructura de las

enzimas, es decir, en la parte proteica de esa estructura (que contiene aminoácidos). Las enzimas son catalizadores específicos de los procesos de nutrición de las plantas, ya sea en los procesos anabólicos (construcción de moléculas grandes a partir de otras pequeñas) o en los procesos catabólicos (degradación de moléculas grandes hasta moléculas pequeñas). No todas las proteínas tienen funciones enzimáticas.

Otras funciones en la planta

El N participa en la síntesis de aminoácidos, de ácidos nucleicos, de carbohidratos y de proteínas. Es también regulador del crecimiento, porque promueve la reproducción celular y, por ende, el macollamiento de la planta, el aumento en tamaño de las hojas, el incremento en el número de granos por panícula y en el tamaño de los granos, la rapidez de llenado de los granos, y el incremento en el contenido proteico de los granos.

El número de granos producidos define el rendimiento del cultivo; Yoshida (1972; 1978) reporta que existe una correlación positiva entre el número de granos por unidad de área y el porcentaje de N absorbido por la planta al momento de la floración. Castilla y Reyes (2003) evaluaron la respuesta de la variedad Fedearroz 50 a dosis y épocas de aplicación de N en Ibagué, Colombia, bajo condiciones de riego corrido, y encontraron que el número de macollas por planta y el número de granos por panícula no respondían a las épocas ni a las dosis empleadas; aumentaba, en cambio, el número de granos llenos y disminuía el 'vaneamiento' cuando se fraccionaban las aplicaciones de N.

Aunque el crecimiento de las raíces del arroz depende de la variedad, el medio de cultivo ejerce un influjo importante en él. González et al. (1985) sugieren que la longitud de las raíces tiende a disminuir, en la medida en que se incrementa el nivel de N aplicado.

Muchas enfermedades del arroz se asocian a un inadecuado equilibrio nutricional; por ejemplo, una dosis elevada de N hace a las plantas susceptibles a enfermedades como la pudrición de la vaina (*Sarocladium oryzae*).

Dinámica en la planta

Las plantas toman el N como ión amonio (NH_4^+) o como ión nitrato (NO_3^-). Este hecho, sumado a ciertas propiedades del suelo (por ejemplo, el pH y la mineralogía de las arcillas) y al método de siembra, define la forma en que se aplicará el N al suelo.

La mayor parte del NH_4^+ que toma la planta se incorpora a los compuestos orgánicos en las raíces, mientras que el nitrato (NO_3^-) es móvil en el xilema y se puede almacenar en las vacuolas y demás órganos aéreos de la planta. La acumulación de nitratos en la planta es de importancia para el balance iónico (anión−catión) y para la osmorregulación. Ahora bien, para cumplir con su función esencial como nutriente vegetal, el NO_3^- (nitrato) se debe reducir a NH_4^+ (amonio) para ser incorporado a los esqueletos carbonados en la síntesis de los aminoácidos, proceso que se denomina 'asimilación del amonio'; este proceso es tan importante para la vida de las plantas como la reducción y asimilación del CO_2 en la fotosíntesis (Marschner, 1996; Ascon Bieto y Talon, 2000; Crawford et al., 2000).

La absorción del N por la planta se caracteriza por una típica cinética de saturación; esto indica que el transporte del nutriente a través del plasmalema de las células de la raíz lo facilita una permeasa o proteína transportadora. Esta absorción requiere energía metabólica y la energía disminuye a temperatura baja, en

anaerobiosis y en presencia de los inhibidores de la respiración.

Absorción del ión nitrato. Las plantas presentan dos sistemas de absorción de nitrato:

- Uno, constituido por permeasas, se satura a una concentración externa inferior a 1mM.
- Otro, que funciona cuando la concentración externa es superior a 1mM y no presenta cinética de saturación (indicando así que está constituido por canales iónicos).

La absorción del nitrato depende entonces del pH externo. Es posible que sea transportado al interior de la célula mediante el mecanismo de simporte $2H^+/NO_3^-$; ahora bien, para sustentar ese simporte, se requiere el gradiente de potencial electroquímico del H^+, el cual se mantiene gracias a la H^+-ATP-asa que transporta H^+ unidireccionalmente al exterior, con gasto de energía metabólica proveniente de la respiración de las células de la raíz.

La reducción del nitrato a amonio está mediada por dos enzimas. La nitrato-reductasa (NR), para reducirlo a nitrito (NO_2^-) en una reacción que consume dos electrones suministrados por una molécula de piridín–nucleótido reducido; el nitrito es reducido luego a amonio por la nitrito reductasa (NiR), en una reacción que requiere 6 electrones donados por la ferredoxina (Fd) reducida. El poder reductor requerido se genera en las reacciones lumínicas de la fotosíntesis o en la glucólisis y la respiración.

La mayoría de las raíces de las plantas superiores están en capacidad de reducir entre el 5% y el 95% del nitrato tomado por ellas. La relación entre la reducción que se hace en las raíces y la que ocurre en las ramas depende de factores como la cantidad de nitrato suministrado, el genotipo de la planta y la edad de ésta; esta relación es de gran importancia en la nutrición mineral y en la economía del C.

En general, cuando la disponibilidad de NO_3^- en el suelo es baja, una gran parte de éste se reduce en las raíces; cuando aumenta esa disponibilidad, el nitrato es transportado a la parte aérea. Hay grandes diferencias entre las especies vegetales respecto a la cantidad de nitrato reducido en las raíces en respuesta al aumento de ese ión en la solución externa. La reducción del NO_3^- y su asimilación requieren mucha energía y constituyen un proceso costoso cuando se llevan a cabo en las raíces. En términos de ATP, ese proceso necesita 15 moles de ATP para reducir un mol de NO_3^- y 5 moles de ATP para asimilar el NH_4^+ obtenido.

Asimilación del amonio. El principal paso en la asimilación del NH_4^+, por las raíces es su incorporación a los aminoácidos y a las amidas, haciendo un intercambio de protones para compensar cargas. La absorción de NH_4^+, a través de la membrana celular, ocurre con liberación de protones. Dado que las raíces tienen una capacidad limitada para disponer de protones, casi toda la asimilación del NH_4^+ se hace en ellas; el N es transportado entonces vía xilema, en forma de aminoácidos y amidas, a la parte aérea de la planta. La asimilación del amonio por las raíces también requiere energía.

Tanto la incorporación del N del suelo (absorción y reducción del ión NO_3^-) como la fijación del N atmosférico (N_2 molecular) se llevan a cabo mediante la transformación de ambos en NH_4^+. En la asimilación del NH_4^+ intervienen las enzimas glutamato deshidrogenasa, glutamina sintetasa y glutamato sintetasa.

- La glutamato deshidrogenasa cataliza la reacción que ocurre entre el amoníaco y el α-oxoglutarato, en la que se produce α-imino-glutarato, con desprendimiento de una molécula de H_2O. El α-imino-glutarato, en presencia de NAD(P)H y de protones (H^+), produce el glutamato. Esta primera fase de la asimilación del amonio se conoce como aminación reductiva del α-oxoglutarato, y esta reacción se considera la más importante de la transformación del NH_4^+ en aminoácidos en las plantas superiores.
- Existe una vía alterna, en la que intervienen dos reacciones: ambas ocurren en los cloroplastos, se producen en serie y están catalizadas por las enzimas glutamina sintetasa y glutamato sintetasa. En presencia de la glutamina sintetasa y de Mg^{2+}, el glutamato reacciona con el NH_4^+ y con el ATP (procedente de la fotofosforilación) y produce glutamina, ADP y fosfato libre. En un medio reductor, en presencia de glutamato sintetasa, y catalizada la reacción por la enzima glutamina oxoglutarato amino transferasa (GOGAT), la glutamina transfiere su grupo $–NH_2$ al α–oxoglutarato, para producir glutamato. En las plantas superiores, el medio reductor necesario lo proporciona la ferredoxina, que aporta los electrones. En general, a partir de una molécula de amonio y otra de α–oxoglutarato se produce una molécula de glutamato. La actividad de esta segunda vía de asimilación del NH_4^+ depende del estado energético del sistema, es decir, de su disponibilidad de ATP.

Nutrición con NH_4^+ o NO_3^-. Las plantas adaptadas a suelos ácidos y a suelos con bajo potencial redox, como el arroz, prefieren el suministro de N en forma de NH_4^+. Las plantas que se adaptan a un pH alto y a un suelo calcáreo prefieren el NO_3^-. Sin embargo, como regla general, las mayores tasas de crecimiento vegetal y de rendimiento de cultivos se obtienen con suplementos en que se combinan el NH_4^+ y el NO_3^-. Puesto que los iones amonio y nitrato comprenden el 80% del total de cationes y aniones absorbidos por la planta, la forma en que la planta absorbe el N tiene un impacto fuerte, pero inverso, en la absorción de otros aniones y cationes; afecta también la regulación del pH en la célula y en la rizosfera. La asimilación del amonio en las raíces libera alrededor de un protón por molécula de amonio absorbida, el cual debe ser excretado hacia el medio externo. Cuando el pH es bajo, la excreción neta de protones es impar y el pH del citosol baja; esto explica la relación entre el pH y la baja tasa de crecimiento de las plantas que se fertilizan con amonio. Por otro lado, el NH_4^+ es potencialmente tóxico si se transforma en NH_3 en el interior de la planta.

Muchos factores promueven la toma de N por la planta de arroz. Según Yamakawa et al. (2000), la cantidad de N que toma la planta estaría determinada por el *N disponible* en el suelo más que por la demanda nutricional de la planta o por su habilidad para tomar el N después del inicio de la panícula, condiciones éstas relacionadas con la variedad sembrada. El rendimiento de una variedad depende, por tanto, de la disponibilidad del elemento en las etapas clave del desarrollo de las plantas; la variedad CICA 8, por ejemplo, absorbe la mayor cantidad de N en las etapas de floración (52%) y de llenado del grano (48%).

Dependiendo de la especie vegetal, estado de desarrollo y órgano de la planta, la concentración óptima de N en la planta varía entre el 2% y el 5% respecto al peso seco. El arroz toma el N con más intensidad en las primeras etapas de su desarrollo, hasta el final del período

vegetativo (Figura 1); la absorción desciende levemente durante la etapa de máximo macollamiento y de diferenciación, y aumenta con rapidez hasta la etapa de grano pastoso (Perdomo et al., 1985).

Distribución del nitrógeno en la planta de arroz. Antes de la floración, la mayor cantidad del N absorbido se acumula en la lámina y en la vaina de las hojas; de allí es transportado al grano, donde se acumulará el 75% del N absorbido.

El contenido de N en *el grano* depende también de la cantidad del elemento disponible en el suelo, ya sea proveniente de la fertilidad natural o de la aplicación de fertilizantes. El contenido de N en el grano aumenta (Cuadro 5) cuando se incrementa la

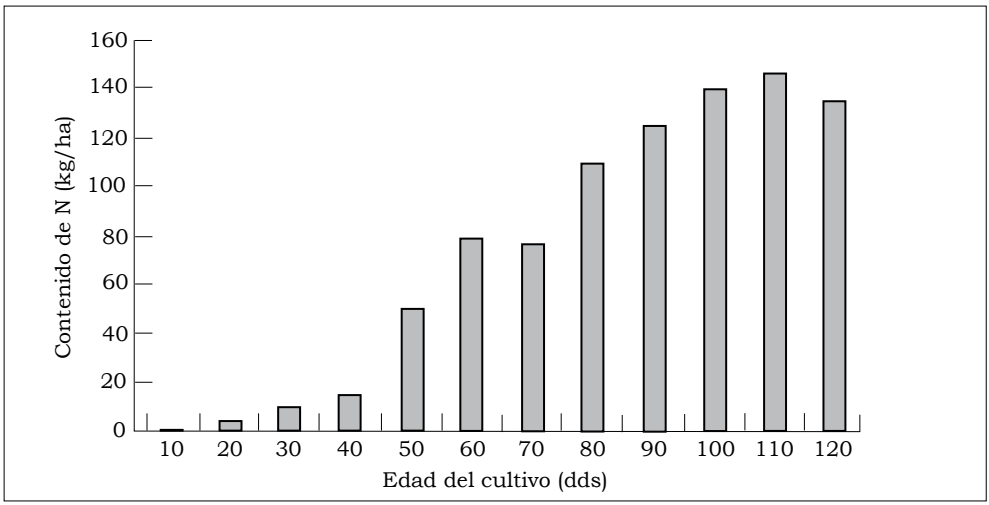


Figura 1. Contenido de nitrógeno (N) en las diferentes etapas de desarrollo de las plantas de la variedad IR 36 bien fertilizada; dds = días después de la siembra. (Adaptada de Fernández et al., 1978.)

Cuadro 5. Efecto de la dosis de nitrógeno (N) aplicado al suelo en el contenido de N del grano de tres variedades de arroz de siembra directa.

Dosis de N (kg/ha)	N en el grano (%) de la variedad		
	IR 42	CICA 8	CICA 4
0	1.00	0.90	0.97
30	0.99	0.93	0.93
60	0.96	1.01	0.96
90	1.04	1.06	1.00
120	1.12	1.05	1.08
150	1.06	1.04	1.01
180	1.15	1.17	1.15
210	1.17	1.19	1.20

FUENTE: Salisbury y Ross, 2000.

dosis de N aplicado; la variedad, por tanto, ejerce poca influencia en este fenómeno. Estos datos dan una idea de la importancia que tiene la cantidad de N que extrae del suelo un cultivo de arroz en el campo.

Síntomas de deficiencia y nivel crítico
Las plantas de todos los cultivos requieren un contenido determinado de nutrientes para que puedan desarrollarse y producir. Cuando el contenido de algún nutriente es inferior a su nivel o rango óptimo, se presentan síntomas de deficiencia del nutriente y, por tanto, se espera respuesta positiva de la planta cuando se aplique ese elemento al suelo. En el cultivo del arroz (Yoshida, 1981), el nivel crítico de N en la lámina foliar, en la etapa de macollamiento, está cerca del 2.5%; Galeano (1991) reportó que el contenido normal de N en el arroz era de 4.25%.

Los síntomas de deficiencia de N en la planta de arroz son los siguientes:

- Clorosis en las hojas, causada por la disminución del contenido de clorofila: se inicia en las hojas viejas porque, dada la movilidad del N en la planta, éste se transporta a las hojas jóvenes en crecimiento.
- Clorosis generalizada, cuando la ausencia de N es severa.
- Tendencia al raquitismo en las plantas y macollamiento escaso (como efecto de la deficiencia severa).

Fósforo: funciones importantes

El fósforo (P) es un elemento estructural cuya función se manifiesta principalmente en los ácidos nucleicos. Estos ácidos, como unidades de la molécula de ADN, son transportadores de la información genética y, como unidades estructurales del ARN, responden por la transducción (o sea, la traslación) de la información genética. El P presente en el ADN y en el ARN forma un puente entre las unidades de ribonucleósidos para constituir las macromoléculas de los ácidos. El P es el responsable de la naturaleza altamente ácida de los ácidos nucleicos.

El P está presente también en los fosfolípidos de las biomembranas y en la transferencia de energía y, aunque está presente en pequeñas concentraciones, mantiene activa la maquinaria metabólica de las células. Se han identificado más de 50 ésteres de fosfato y azúcar; 10 de ellos, incluyendo la glucosa-6-fosfato y el fosfo-gliceraldehído, se encuentran en cantidades relativamente altas en las células.

El P inorgánico (Pi) tiene un rol regulador en muchas reacciones enzimáticas, en las que puede ser sustrato o producto terminal, como en ésta: ATP → ADP + Pi. El almacenamiento del Pi es esencial para la regulación de rutas metabólicas en el citoplasma y en los cloroplastos; en los tejidos del fruto del tomate, el Pi pasa de la vacuola al citoplasma para activar la fosfo-fructoquinasa, de tal manera que el incremento de Pi en las vacuolas puede iniciar la respiración relacionada con la maduración del fruto.

Cuando las plantas tienen un suministro adecuado de fósforo, las vacuolas de las células almacenan entre el 85% y el 95% del Pi que contienen (Bieleski y Ferguson, 1983, citados por Marschner, 1996). En cambio, cuando hay deficiencia de fósforo, el Pi se encuentra en mayor proporción en el citoplasma y en los cloroplastos de las hojas (Foyer y Spencer, 1986).

Los fosfatos son asimilados por las células cuando son incorporados en el ATP. La asimilación de fosfatos inorgánicos corresponde al proceso oxidativo de la fosforilación y se representa en la siguiente reacción:

$$ADP + Pi \rightarrow ATP + H_2O$$

donde ADP = adenosín–difosfato, Pi = ácido fosfórico, ATP = adenosín-trifosfato.

Esta reacción ocurre en conjunción con la oxidación del NADH (ácido succínico) en la mitocondria (Noggle y Fritz, 1976). Además de la asimilación del fosfato en la fosforilación, parece que parte del P absorbido es asimilado por las hojas en la fase lumínica de la fotosíntesis, reacción que se conoce como la fosforilación fotosintética (Noggle y Fritz, 1976). El fosfato asimilado como ATP se transfiere rápidamente, en reacciones metabólicas subsecuentes, a una amplia variedad de productos de la planta, entre ellos los glucofosfatos que participan en la fotosíntesis y en la respiración; además, se incorpora en los nucleótidos mencionados (ADN y ARN). Para su incorporación en el ATP, el Pi puede ser asimilado en una de las reacciones de la glicólisis, o sea, cuando el fosfato se incorpora al ácido 1,3–difosfafoglicérico (Salisbury y Ross, 1994).

Otras funciones específicas

El P es un ***componente*** de muchos glucofosfatos que participan en la fotosíntesis, en la respiración y en otros procesos metabólicos; de diversos nucleótidos, de coenzimas, de los fosfolípidos presentes en las membranas celulares, del ácido fítico. Está, además, su importante función en el metabolismo energético como integrante del ATP, del ADP, del AMP y del pirofosfato (PPi).

El P es importante en los siguientes ***procesos***: la división celular y la formación de grasas y de albúmina; la floración, la fructificación y la formación de las semillas; la maduración de las cosechas; el desarrollo de las raíces, especialmente de las laterales y las fibrosas; el vigor de los tallos herbáceos, que ayuda a evitar el volcamiento; la calidad de la cosecha, especialmente de los forrajes; y la resistencia a ciertas enfermedades (Buckman y Brady, 1960).

Dinámica del fósforo en la planta de arroz

La planta ***absorbe*** el P en forma de iones fosfato ($H_2PO_4^-$ y HPO_4^{-2}); por tanto, el pH del suelo influye en la abundancia de una u otra forma del ión fosfato en el suelo y, por ende, en la forma absorbida por la planta: por debajo del pH 7 se favorece la absorción del ión $H_2PO_4^-$ (fosfato diácido) y por encima de ese pH, la del ión HPO_4^{-2} (fosfato monoácido).

A diferencia de lo que ocurre con el N y el S, los iones fosfato no se reducen químicamente dentro de la planta. La mayor parte del fosfato absorbido se incorpora a moléculas orgánicas (del tipo de los ésteres) en las raíces (Brownell, 2000), y estos compuestos se acumulan en las raíces y en las hojas hasta la iniciación de la panícula (Perdomo et al., 1985); sólo una fracción permanece como fosfato libre.

El P se ***redistribuye*** fácilmente en la planta de arroz pasando de un órgano a otro. Su velocidad de absorción, que es muy baja en las primeras etapas del desarrollo de la planta, aumenta hasta poco después de la floración (Rodríguez, 1985); al llegar la floración, el P es transportado rápidamente a los granos, y en ellos se acumula cerca del 75% del total absorbido.

Síntomas de deficiencia y nivel crítico

Por ser un nutriente muy móvil, se traslada desde las hojas viejas y tiende a acumularse en las hojas jóvenes, en las flores y en las semillas en formación. Por consiguiente, su deficiencia se manifiesta primero en las hojas viejas de las plantas (Salisbury y Ross, 1994). Cuando se presenta deficiencia de P en las plantas, se inhibe el crecimiento y la planta muestra enanismo. Las hojas se tornan

verde oscuras, porque la concentración de proteína y de clorofila no está muy afectada y, en ocasiones, aumenta; sin embargo la eficiencia fotosintética por unidad de clorofila disminuye. Cuando la deficiencia se vuelve severa, las hojas van cambiando al color morado y al café oscuro y mueren: en las hojas viejas, principalmente, se han acumulado pigmentos del grupo de las antocianinas. La madurez se retarda; en muchas especies, el N y el P interactúan de manera estrecha para regular la madurez. El exceso de P, por su parte, suele causar un incremento del crecimiento de las raíces en relación con el crecimiento de la parte aérea.

Estos síntomas manifiestan el carácter esencial del P como nutriente y, por tanto, su participación en procesos metabólicos muy importantes. Los síntomas de deficiencia en el arroz aparecen cuando el contenido de P en la lámina foliar (en la etapa de macollamiento) es inferior al 0.1% (Yoshida, 1981). La concentración normal de P en las hojas se ha calculado en 0.25%, medida en la materia seca (Galeano, 1991).

Potasio: funciones importantes

El potasio (K) es el cuarto elemento de la demanda nutricional del cultivo de arroz, después del C, el H y el O. Esta afirmación, sin embargo, tiene excepciones: en algunas variedades, por ejemplo en Fedearroz 50, el K es el nutriente de mayor importancia, y en otras, como Fedearroz 2000, el N ocupa esa posición (Ordóñez, 2003).

Aunque se ha demostrado el carácter esencial del K en la nutrición del arroz (y de otras especies), no hay pruebas evidentes de que se encuentre en algún compuesto que forme parte de una estructura de la célula o que desempeñe una función celular específica. No obstante, se ha comprobado su participación en las siguientes funciones de la planta:

- La síntesis de proteínas.
- La activación de muchas enzimas, entre ellas la sintetasa de la sacarosa (síntesis de glucósidos a partir de monosacáridos) y la sintetasa de la glutamina (el K cataliza la formación de glutamina).
- La actividad fotosintética, ya que el K se acumula en la superficie de los cloroplastos y penetra luego en su interior, donde neutraliza los ácidos orgánicos que se forman en la fotosíntesis, manteniendo de este modo el pH óptimo para el metabolismo foliar (Navarro, 2000).
- La síntesis del almidón.

El ***almidón*** es un carbohidrato de reserva que desempeña un papel primordial en la mayoría de las especies vegetales (Jenner, 1982). Es un producto directo de la fotosíntesis y se acumula, generalmente, en los cloroplastos de las hojas; en el arroz, en cambio, el almidón de calidad se acumula en mayor cantidad en el grano. El proceso de formación del almidón en el citoplasma celular implica la donación repetida (a una estructura molecular seriada) de unidades de glucosa que provienen de un azúcar nucleotídico denominado difosfoglucosa de adenosina, ADPG (Calvin, 1954); pues bien, el K activa la enzima 'sintetasa del almidón' que cataliza la anterior síntesis de este carbohidrato. Esta activación convierte al K en un nutriente esencial.

Otras funciones del potasio

Algunas funciones del K en el arroz se han inferido de los síntomas de su deficiencia:

- **Síntoma.** Efectos tóxicos de la acumulación de amoníaco (NH_3) en la planta por ausencia del K.
- **Función deducida.** El K contribuye al metabolismo del N participando en la

síntesis de aminoácidos, lo que evita la acumulación del N como amoníaco.
- Participa en el desarrollo de las macollas de la planta, en la formación de la panícula, en la resistencia al acame (volcamiento de las plantas), en el transporte de asimilados de la fotosíntesis, en la aceleración de la floración y de la maduración, y en el incremento del tamaño y del peso del grano.
- Contribuye a que el porcentaje de granos partidos en la molinería se reduzca, lo que favorece el rendimiento industrial del arroz.
- Ayuda a la planta de arroz a resistir varias enfermedades (acción demostrada en diversas investigaciones), entre otras la pudrición de la vaina (*Sarocladium oryzae*) y el añublo de la vaina (*Rhizoctonia solani*); la resistencia mejora cuando el nivel de K en la planta es el adecuado.

Dinámica del potasio en la planta de arroz

La planta absorbe el K en forma de K^+, como se observa en la Figura 2. Esta absorción (Perdomo et al., 1985) es una función del crecimiento de la planta: aumenta hasta el final de la etapa de grano lechoso y luego decae. El contenido máximo de K en la planta ocurre al final de dicha etapa.

Si lo comparamos con la acumulación de N y de P, sólo el 12% del total de K absorbido por la planta se acumula en el grano; el resto (88%) se acumula en las partes vegetativas de la planta.

Síntomas de deficiencia y nivel crítico

- **Síntomas de deficiencia.** Se observan (como ocurre con los demás elementos nutritivos móviles) en las hojas viejas; éstas presentan una coloración amarillenta que empieza en su ápice y avanza hacia su base. Cuando la deficiencia de K se agudiza, aparecen manchas necróticas en la lámina de esas hojas.
- **Nivel crítico.** Cuando el contenido de K en la paja (hojas secas) del arroz en la fase de madurez es de 1%, en base seca, se llega a ese nivel (Yoshida, 1981); si ese contenido tiene un valor cercano a 2.4%, la nutrición del cultivo ha sido la adecuada (Galeano, 1991).

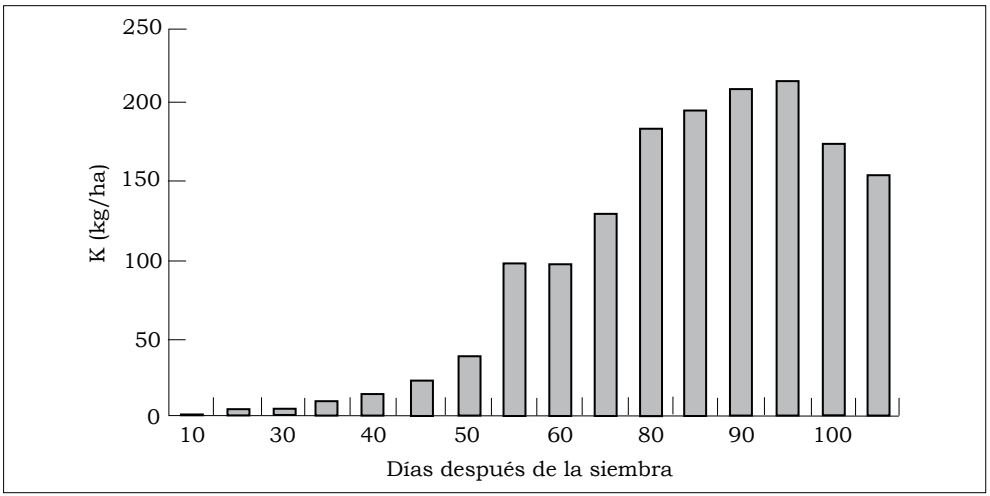


Figura 2. Absorción de potasio (K) por la planta en distintas etapas de su desarrollo, en la variedad de arroz IR 36 bien fertilizada. (Adaptada de Fernández et al., 1978.)

Calcio: funciones importantes

Las plantas toman el calcio (Ca) como ión divalente (Ca^{2+}), que es poco móvil en la planta. Actúa como enlace entre los fofolípidos y las proteínas de la membrana; provee enlaces intermoleculares estables, pero reversibles, especialmente en las paredes celulares y en la membrana plasmática; se encuentra en el protoplasma y en las membranas celulares de las hojas jóvenes, donde se une a ciertos polisacáridos formando pectatos (Kinzel, 1989). Se encuentra también en las vacuolas de las células de las hojas adultas formando cristales insolubles de oxalato de calcio, y algunos fosfatos, carbonatos y sulfatos de calcio que precipitan en esa solución.

Funciona como segundo mensajero en la conducción de señales entre los factores ambientales y los mecanismos de respuesta de las plantas, en términos de crecimiento y desarrollo; esta función está relacionada con la división celular.

Dinámica del calcio en la planta de arroz

En términos generales, el Ca puede ser suministrado en cantidades altas y alcanzar más del 10% del peso seco de las hojas maduras, sin que se presenten síntomas de toxicidad; sin embargo, la concentración adecuada de Ca en las plantas varía entre el 0.1% y un poco más del 5% del peso seco. El requerimiento de este elemento es menor en las plantas monocotiledóneas que en las dicotiledóneas. La concentración adecuada de Ca en la lámina foliar del arroz al iniciar el macollamiento es de 0.15% (Howeler, 1983) y en la planta en general es de 0.24%, aproximadamente (Galeano, 1991); en las hojas de tomate está entre 3.0% y 4.0% y en las de cítricos entre 3.0% y 7.0% (Bergmann, 1992).

El arroz toma el Ca de manera continua hasta la etapa de grano pastoso. Después de la floración aumenta la concentración de Ca en las hojas y en los tallos. Las etapas de desarrollo de la planta de arroz condicionan, en cierto modo, la absorción del Ca:

- A la iniciación de la panícula, ha absorbido ya el 14.1% del total tomado por la planta.
- De esta etapa a la fase de maduración absorbe el 85.9% restante (Perdomo et al., 1985).

Síntomas de deficiencia y nivel crítico

El Ca es un elemento inmóvil en la planta de arroz. Se acumula, por tanto, en las hojas viejas, y los síntomas de deficiencia —que aparecen entonces en las raíces, en los tallos y en las hojas jóvenes— son los siguientes:

- Coloración blanquecina en las zonas meristemáticas, donde la actividad biológica es intensa y la división celular es continua.
- Enrollamiento del punto de crecimiento de las hojas superiores, que mueren poco después.
- Apariencia raquítica, en general, de la planta.

Estos síntomas corresponden, al llegar la madurez, a un nivel crítico del elemento en la 'paja' (hojas secas) de 0.15% (Yoshida, 1981).

Magnesio: funciones importantes

El magnesio (Mg) es tomado por las plantas como ión divalente Mg^{2+}. Su tasa de absorción es fuertemente reducida por otros cationes como el K^+, el NH_4^+, el Ca^{2+} y el Mn^{2+}; la reduce también el pH bajo del medio. El Mg es importante en la fotosíntesis porque es

el átomo central de la molécula de clorofila, y en el metabolismo glucídico, porque muchas de las enzimas que intervienen en ese metabolismo requieren de Mg como activador. Es, además, activador de las enzimas que intervienen en la síntesis de los ácidos nucleicos (ADN y ARN) a partir de los nucleótidos polifosfatados. Estas reacciones se llevan a cabo en presencia de un transportador fosfato. Calvin indicó, en 1954, que diversas coenzimas, como el ATP o el ADP, pueden unirse a la superficie de las enzimas mediante un complejo quelatador.

Su principal función está en las hojas: es el átomo central de la molécula de clorofila. Su distribución como nutriente es la siguiente: entre el 6% y el 25% del Mg se destina a la síntesis de la clorofila, del 5% al 10% a la síntesis de pectatos de las paredes celulares o a la formación de sales solubles que precipitan en la vacuola; el resto (del 60% al 90%) es extractable con agua.

La deficiencia de Mg reduce el crecimiento de la planta y los síntomas visuales aparecen cuando la fracción del Mg destinado a la clorofila excede en un 20% a 25% el total de Mg suministrado a la planta.

Dinámica del magnesio en la planta de arroz

La concentración de Mg en los tejidos vegetales está entre el 0.15% y el 0.35% del peso seco. Yoshida (1981) indica que el nivel crítico de concentración de Mg en la paja del arroz (fase de madurez) es de 0.10% y que, en promedio, la concentración adecuada del elemento en todas la etapas de crecimiento de la planta es de 0.14%. De la absorción total de Mg que hace la planta de arroz, el 12.71% tiene lugar desde la emergencia hasta la etapa de iniciación de la panícula; de aquí a la maduración absorbe el 87.29% restante (Perdomo et al., 1985).

Síntomas de deficiencia y nivel crítico de magnesio

La deficiencia de Mg altera el equilibrio metabólico de la planta porque sin él sería imposible el proceso de la fotosíntesis. El primer síntoma visible de esa deficiencia es una clorosis en las hojas viejas (lo que prueba su movilidad en la planta), que suele ser intervenal, ya que las células del mesófilo, situadas cerca de los haces vasculares, retienen la clorofila (con el Mg) durante un tiempo más largo que las del parénquima, las cuales se encuentran entre los haces y las franjas de mesófilo mencionados (Kramer, 2000).

En la planta de arroz se altera el macollamiento y las hojas adquieren una coloración amarillenta, se vuelven onduladas y se doblan.

Azufre: funciones importantes

Las plantas toman casi todo el azufre (S) por las raíces en forma de SO_4^{2-} y, en menor cantidad, en forma de SO_2 por difusión gaseosa en las hojas, aunque una concentración alta de SO_2 en el aire puede causar toxicidad a un cultivo. El SO_4^{2-} atraviesa la membrana celular mediante transporte activo impulsado por la bomba ATP-asa y en co-transporte acompañado de $3H^+$. Cuando el pH externo es alto o si la actividad de la bomba de protones desciende, el gradiente disminuye y se inhibe su absorción.

Una vez absorbido, el sulfato se reduce pasando por un estado activado en el cual intervienen el 3-fosfoadenina-5-fosfosulfato (PAPS) y el ATP. El PAPS se sintetiza en dos pasos: primero se activa el sulfato mediante ATP y la enzima sulfurilasa para formar adenosín-S-fosfosulfurato (APS); luego, el APS se convierte en PAPS por la acción de una

quinasa específica. Éstas son las reacciones:

$$SO_4^{-2} + ATP \xrightarrow{\text{SULFURILASA}} APS + P - P$$

$$APS + ATP \xrightarrow{\text{QUINASA}} PAPS + ADP$$

El S, en su forma reducida, hace parte de la cistina, la cisteína y la metionina, tres aminoácidos constitutivos de proteínas y que contienen el 90% del S encontrado en las plantas. El S hace parte también de vitaminas como la biotina y la tiamina, y de la coenzima A. Su función en la planta está relacionada, en parte, con las actividades metabólicas de estos compuestos.

La función del S se relaciona con la estructura de las proteínas, en las cuales establece puentes mediante enlaces covalentes; estos enlaces ayudan a los enlaces peptídicos y a los puentes de H a estabilizar la estructura de las proteínas. Los grupos sulfhidrilo (SH^-) constituyen sitios a los que se unen cationes metálicos, lo que permite la formación de cadenas proteicas alrededor del metal. Las funciones metabólicas se refieren a la acción de los aminoácidos de las proteínas, de los aminoácidos libres y de otros compuestos de S de bajo peso molecular. El S actúa a través de los grupos sulfhidrilo de muchas enzimas como punto de unión del sustrato con la enzima. Interviene además en la fotosíntesis y en la descarboxilación mediante su presencia en la biotina.

Dinámica del azufre en la planta de arroz

La absorción que hace la planta de arroz del S es similar a la que hace con el Ca y el Mg, es decir, se incrementa conforme aumenta la cantidad de materia seca de la planta. Hasta la etapa de iniciación del primordio floral, la planta ha tomado el 24.2% del total que absorberá, y de aquí hasta la fase de madurez toma el restante 75.8% (Perdomo, 1985).

El análisis de los tejidos de varias partes de las plantas de arroz cultivadas indica que la concentración de S en ellos representa una fracción de la concentración de N (entre 1/10 y 1/15 de ésta). De otro lado, la deficiencia de S no afecta la producción de grano, si se aplica S antes de la formación del primordio floral; esta práctica reduce, además, el porcentaje de grano partido en la molinería (Riobueno, 2003).

Síntomas de deficiencia y nivel crítico del azufre

La deficiencia del S en las plantas es causa de desórdenes metabólicos tales como la disminución de la síntesis de proteína, una alta relación [N soluble/N proteico], y la disminución de la actividad respiratoria, de la fotosíntesis y de la fijación de N. Otros síntomas visibles son: una clorosis general que comienza en las hojas más jóvenes; en algunas especies, después de la clorosis, la producción de compuestos antocianínicos; plantas pequeñas, fusiformes, de tallos cortos y delgados; desarrollo tardío y madurez retrasada, especialmente en los cereales de grano. Estos síntomas se pueden confundir con los del N o pueden pasar inadvertidos cuando la deficiencia es leve; no obstante, el rendimiento y la calidad de la cosecha se reducen de manera notable.

En las plantas de arroz, en particular, el síntoma principal de deficiencia de S es una clorosis general de las hojas jóvenes. Cuando aparecen éste y otros síntomas, el contenido de S en la parte aérea de la planta, en la etapa de macollamiento, es de 0.16%; en la fase de madurez, el contenido crítico de S en la paja del arroz tiene un valor de 0.06% (Yoshida, 1981).

Silicio: importancia en la planta

En los organismos unicelulares, el silicio (Si) es un elemento esencial reconocido. Entre las plantas superiores se conocen las llamadas plantas silicofílicas, como el arroz, que presentan síntomas de deficiencia de Si como la disminución del rendimiento, la necrosis y la marchitez de las hojas maduras cuando el suministro de este elemento es inadecuado. Sin embargo, el Si no se considera elemento esencial porque aún no se ha comprobado que la planta no pueda completar su ciclo de vida en su ausencia.

El Si es el segundo elemento más abundante en la naturaleza. Es soluble como $Si(OH)_4$, el cual se encuentra naturalmente en bajas concentraciones cuando el pH es alto. En las gramíneas, se acumula en sus paredes como óxido hidratado de silicio ($SiO_2 \cdot nH_2O$) que le da mayor resistencia al ataque de los hongos, porque forma una barrera física; además, los compuestos sílico-orgánicos son muy estables frente a las enzimas de los organismos patógenos. El ácido silícico, $Si(OH)_4$, es muy parecido al ácido bórico, $B(OH)_3$; ambos son débiles en solución acuosa e interactúan con pectinas y polifenoles en las paredes celulares en que se localizan. A diferencia del B, el carácter esencial del Si sólo se ha comprobado en algunas especies de plantas superiores, aunque es benéfico para muchas bajo ciertas condiciones; las ciperáceas, las gramíneas y algunas leguminosas acumulan el Si.

La planta de arroz absorbe el Si de manera creciente con el tiempo, y el elemento se acumula en la paja, que contiene cerca de 140 kg/ha a los 105 días de edad del cultivo, cantidad que ha aumentado a unos 243 kg/ha a los 140 días (Figura 3). En la figura no se consideran los valores correspondientes al contenido de Si en la panícula y en el grano; en la panícula, a los 105 días de edad de la planta, se han acumulado, aproximadamente, 26 kg/ha de Si; en el grano, a los 140 días, ese contenido ha aumentado a 137 kg/ha (33% del total absorbido por la planta).

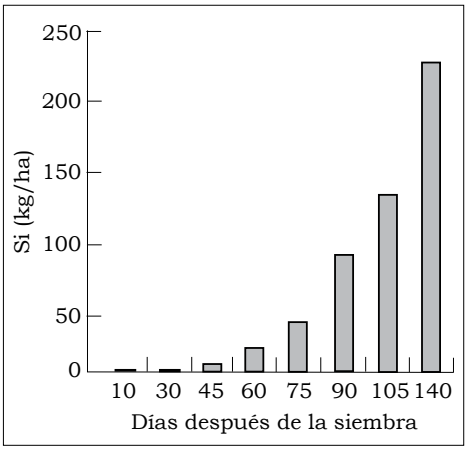


Figura 3. Absorción de silicio (Si) por las raíces de las plantas de la variedad CICA 8 en la estación experimental CIAT-Palmira. (Adaptada de Perdomo et al., 1985.)

En realidad, el requerimiento de Si es muy bajo en el arroz y ocurre en el estado reproductivo (Marschmer, 1996). El nivel crítico de este elemento en la paja, en la etapa de madurez, está en 5% (Yoshida, 1981).

Funciones del silicio en la planta

Las funciones del Si en la planta de arroz no son muy claras. Por sus efectos benéficos se conocen las siguientes:

- Ayuda a la planta a resistir el ataque de insectos y las infecciones causadas por hongos.
- Aumenta la consistencia y la fortaleza de los tallos (evitando así el acame o vuelco de las plantas).
- Participa en la traslocación del fósforo.

- Contribuye al uso eficiente del agua por la planta porque reduce la pérdida de agua en la transpiración.
- Ayuda a aumentar la eficiencia de los fertilizantes nitrogenados, fosfóricos y potásicos.

El Cuadro 6 muestra el efecto de la fertilización con Si en diferentes estados de desarrollo del cultivo del arroz y en distintas partes de la planta. Las aplicaciones de Si al suelo han incrementado la tolerancia de las plantas al exceso de Fe y de Mn (Marschner, 1996), un efecto observado en estudios antiguos y recientes (Castilla, 2003). El Si causa un efecto positivo en el rendimiento del cultivo, en la altura de las plantas y en el proceso de llenado del grano, como lo demostraron los trabajos de Quesada et al. (2002); también contribuye a reducir la incidencia de la piricularia en el cuello de la panícula.

Hierro: importancia en la planta

El hierro (Fe) es un nutriente soluble para las plantas. Está presente en el suelo y en soluciones acuosas en forma de quelato ferroso (Fe^{2+}) y de quelato férrico (Fe^{3+}). Las plantas prefieren tomar el hierro Fe^{2+}, aunque esta preferencia depende de la especie vegetal. En condiciones aeróbicas y con pH fisiológico, la concentración de Fe en ambas formas (ferroso y férrico) es menor que 10^{-15} M. Dado que el Fe es un elemento de transición en la tabla periódica, se caracteriza por su relativa facilidad para modificar su estado de oxidación, es decir,

$$Fe^{3+} \xrightarrow{+e^-} Fe^{2+} \xrightarrow{-e^-} Fe^{3+}$$

y de formar complejos octaedros con varios enlaces. Según el enlace que establezca el Fe, su potencial 'redox', ya sea en forma férrica o ferrosa, varía ampliamente; esta característica es muy importante en los sistemas biológicos y de ella deriva en gran parte la función del Fe en las plantas.

Las raíces toman el Fe como Fe^{2+} y como Fe^{3+}. Cuando llega a la membrana celular, entra por transporte activo a la célula mediante los mismos transportadores que permiten la entrada del Mn, razón por la cual los dos elementos son antagónicos. Para asimilar el Fe^{3+}, la planta necesita la fitoferritina, una proteína que se encuentra principalmente en los cloroplastos. Es una molécula grande con forma de balón, cuyo núcleo es el Fe^{3+} y cuya parte externa es la proteína;

Cuadro 6. Efecto de la fertilización con silicio (Si) (aplicada en dos fases de desarrollo de la planta en diferentes partes de la planta de arroz. Se fertilizó con 100 mg de SiO_2 por litro de solución.

Planta (fase de desarrollo o parte)	Fertilización aplicada			
Fase vegetativa	− Si	+ Si	− Si	+ Si
Fase reproductiva	− Si	− Si	+ Si	+ Si
SiO_2 en tejido vegetal (%)	0.05	2.2	6.9	10.4
Biomasa (g/pote)				
De raíces	4.0	4.3	4.2	4.7
De parte aérea	23.5	26.5	31.0	33.6
Del grano	5.3	6.6	10.3	10.8

FUENTE: Marschner, 1996.

la fitoferritina hace las veces de un almacén de Fe y lo libera lentamente por reducción, o sea, por ganancia de un e^-. Para que el Fe^{3+} pueda ser asimilado por la célula, debe ser reducido a Fe^{2+}; esta tasa de reducción depende del pH del suelo y de la planta, y es mayor en condiciones ácidas.

Funciones

La función principal del Fe es la activación de enzimas, donde actúa como grupo prostético. Interviene, por tanto, en las siguientes reacciones fundamentales de la planta:

- De ***óxido-reducción***, tanto de las hemoproteínas (citocromos, leg-hemoglobina, catalasa, peroxidada y superóxido-dismutasa) como de las proteínas no hémicas (sin grupo heme) que tienen enlace Fe-S, como la ferredoxina y las enzimas reductasa, nitrogenasa y sulfato reductasa.
- De ***fotosíntesis***, donde actúa como transportador de electrones y como catalizador de la biosíntesis de la clorofila (es parte constitutiva de las enzimas responsables), por lo cual, en ausencia de Fe, la planta tiene solamente pigmentos amarillos (xantofilo y caroteno).
- De ***transporte de electrones*** (como integrante de la ferredoxina) en la fotosíntesis y en la reducción de los nitratos.

El Fe forma parte de otras enzimas, como la aconitasa y la xantín-oxidasa, en las que no actúa como óxido-reductor. La fitoferritina es una proteína de reserva que contiene unos 5000 átomos de Fe^{3+}; esto representa del 12% al 23% del Fe de la planta medido en la materia seca, porcentaje que puede alcanzar el 50% en las hojas de color verde oscuro.

Síntomas de deficiencia

La principal consecuencia de la deficiencia de Fe es la inhibición de la síntesis de clorofila, por lo que la deficiencia de este elemento y la del Mg inducen síntomas similares; la del Fe se manifiesta primero en las hojas jóvenes, mientras que la de Mg aparece en las hojas viejas. Está asociada además con la inhibición de la elongación de las raíces, con el incremento del diámetro de la zona apical de las raíces y con la formación de abundantes pelos radicales, tanto en las dicotiledóneas como en las monocotiledóneas (a excepción de las gramíneas).

Muchos síntomas de deficiencia en hojas jóvenes se deben a la baja tasa de traslocación del Fe que, por tal razón, se acumula en las raíces y en las hojas viejas.

La ***concentración crítica*** de Fe en las hojas está entre 50 y 150 mg/kg de biomasa. En términos generales, las plantas C_4 requieren más Fe que las plantas C_3, pero el contenido crítico es similar para ambas y está, en promedio y medido en mg/kg de biomasa, en 72 para las C_3 y en 66 para las C_4. En los meristemos de rápido crecimiento, el contenido crítico de Fe es mayor y está, en mg/kg de biomasa, en aproximadamente 200 para el Fe total y en 70 para el Fe activo. En las leguminosas, el requerimiento de Fe para el desarrollo de los nódulos es particularmente alto.

La absorción de Fe está controlada por el metabolismo y es influida por la presencia de otros cationes. Se ha observado la competencia del Mn^{2+}, del Cu^{2+}, del Ca^{2+}, del Mg^{2+}, del K^+ y del Zn^{2+} durante el proceso de absorción del elemento porque los metales pesados que se agregan al medio inducen deficiencia de Fe en numerosas especies (Marschmer, 1996).

Síntomas visuales característicos
En las ***hojas jóvenes*** se observa una clorosis. Con el avance del estado de carencia, aparece una clorosis internerval. Si la carencia es fuerte, puede llegarse a un amarillamiento total de las hojas (incluyendo la hoja bandera) y aparecen zonas necróticas en los bordes del limbo que ocasionan la caída precoz de las hojas; en casos muy graves, hay defoliación total.

Los ***tallos*** presentan una apariencia fina y curvada y su crecimiento se reduce de manera significativa. En general, en las plantas anuales se reduce el crecimiento, su aspecto es raquítico y su rendimiento bajo. Los árboles se defolian, sus frutos son pequeños y su maduración precoz.

Carencia inducida
Hay especies cultivadas que, aunque crecen en un suelo cuyo contenido de Fe es bueno, presentan una carencia del elemento. La razón de esta carencia inducida o secundaria es la inactivación del Fe ya que, si el suelo es neutro o básico, este elemento se oxida a una forma férrica poco soluble. El efecto en la planta es la falta de clorofila, cuyos síntomas son conocidos. ¿Qué componentes del suelo responden por este fenómeno?

- **Bicarbonato.** Un alto contenido de este compuesto, ya sea en el suelo o en el agua de riego, puede inducir la clorosis férrica (el bicarbonato básico oxida el Fe y lo inmoviliza); este efecto es muy crítico en especies cultivadas que no son eficientes en el uso del Fe y que crecen en suelos calizos: de ahí la correlación entre clorosis y caliza activa. Valores superiores a 7% de caliza activa pueden llevar a la aparición de la clorosis.
- **Nitratos y otros compuestos.** Se han observado efectos similares a los del bicarbonato en suelos que tienen un alto contenido de nitratos. Asimismo, en suelos ácidos, ricos en fosfatos solubles, el Fe puede precipitar en forma de $FePO_4$ y el cultivo responde manifestando una clorosis férrica (el Fe es sustraído como ión Fe^{3+}). En tercer lugar, en presencia de MnO_2, el Fe reducido se oxida pasando a su forma férrica no asimilable; esta reacción depende más de la relación Fe/Mn en el suelo que del contenido absoluto de cada uno de estos elementos.
- **Otros metales.** La carencia puede ser inducida también por el Cu cuando éste sustituye al Fe en los quelatos del suelo, inmovilizándolo. Un efecto similar, aunque menos importante, es producido a veces por el Zn y por el Co.
- **Condiciones climáticas.** Se ha observado una clorosis férrica producida por el frío, porque la absorción de Fe depende de la *temperatura*. En las zonas templadas, por ejemplo, al llegar la primavera aumenta la temperatura del aire y, por tanto, aumenta la demanda de Fe en la planta; puesto que el suelo está aún frío, la absorción de Fe se limita y el cultivo manifiesta la denominada clorosis primaveral, que se revierte cuando el suelo se calienta. Se produce también clorosis por *encharcamiento*, porque el suelo inundado presenta deficiencia de O_2 y exceso de CO_2 el cual, si el suelo es calizo, da origen a bicarbonatos en el medio acuoso.

Se ha establecido (Yoshida et al., 1976) que una concentración de Fe de 10 a 18 ppm en las hojas de arroz anuncia una deficiencia del elemento; se esperaría, por tanto, una respuesta favorable a la aplicación de Fe en ese cultivo. Para corregir la deficiencia de Fe se puede también bajar el pH del suelo aplicando sulfato de calcio o haciendo aspersiones foliares con fertilizantes ferrosos.

Toxicidad del Fe

La toxicidad debida al Fe, denominada bronceado, es un problema serio de los suelos inundados y se considera el segundo factor limitativo del cultivo del arroz. En las zonas secas, esta toxicidad aparece como un efecto de un estrés de agua en edad temprana del cultivo, el cual daña el tejido fotosintético porque promueve la formación, mediante compuestos de Fe como catalizadores, de radicales de O libres en los cloroplastos.

La toxicidad de Fe se presenta cuando la concentración del Fe, en forma soluble, en el suelo es alta, y se reconoce por la coloración amarillo-anaranjada con manchas minúsculas de color carmelita que aparece en las hojas, comenzando por su ápice (Sanzo, 1985). La susceptibilidad del arroz a esta toxicidad depende del estado fisiológico y del estado nutricional de la planta. En sus primeras etapas de crecimiento, el arroz es muy susceptible a la toxicidad causada por el Fe. En la etapa de plántula, y al comienzo del macollamiento, una concentración de Fe soluble de 75 ppm es suficiente para declarar la toxicidad (Tanaka et al., 1966).

Se puede presentar también una 'toxicidad' indirecta del Fe, que se debe al bajo nivel de otros nutrientes, por ejemplo de P, K, Ca y Mg. Howeler (1974) encontró que los cultivos de arroz de los Llanos Orientales de Colombia presentaban síntomas de la toxicidad causada por el Fe; al estudiar los análisis de tejido, no halló, en realidad, un contenidos alto de Fe, sino más bien contenidos bajos de N, de K y de Mg. La investigación reveló que la alta concentración de Fe en la solución del suelo creaba una capa oxidada en la raíz que no permitía la absorción de los elementos mencionados.

Zinc: importancia en la planta

La planta lo toma como catión divalente (Zn^{2+}) y su disponibilidad es mayor cuando el pH es bajo. Está presente en la síntesis del triptófano, aminoácido precursor del ácido indol-acético (AIA), una auxina que es hormona del crecimiento. Tiene, además, una función importante como estabilizador de la clorofila.

- Como ocurre con el Mn y el Mg, el Zn es principalmente un activador de enzimas por su capacidad de formar uniones entre la enzima y el sustrato; no lo es mucho por intervenir en reacciones de óxido reducción. Los siguientes sistemas enzimáticos requieren Zn (Marschner, 1996; Salisbury y Ross, 1994; 2000; López, 1998; Ascon Bieto y Talon, 2000):

  - el NADH-deshidrogenasa;
  - la alcohol deshidrogenasa, que cataliza el paso del acetaldehído a alcohol en la fermentación alcohólica;
  - las anhidrasas carbónicas, que aceleran la hidratación reversible del dióxido de carbono a bicarbonato en la fotosíntesis;
  - algunos tipos de superóxido-dismutasas (SOD), en que interviene el Zn junto con el Cu y que se encuentran en diferentes organelos y en el citoplasma de las células vegetales como defensa importante contra los radicales superóxidos;
  - en la ARN-polimerasa, con la cual (mientras participa en la estabilidad del ribosoma) contribuye a regular la expresión genética.

La baja disponibilidad de Zn, ya sea por bajo contenido, o por la acidez o alcalinidad, alto contenido de materia orgánica, exceso de humedad o sequía, temperaturas altas y alta luminosidad, puede ocasionar síntomas de deficiencia de Zn.

Algunos investigadores señalan que el Zn es, después del N y del P, el tercer elemento nutricional que limita la producción del arroz cultivado con riego, una conclusión que despertaría un interés especial por este elemento.

Dinámica en la planta
Un nivel alto de Fe o de Mn reduce la absorción de Zn por la planta de arroz. Hay reportes de que un nivel alto de P puede inducir una deficiencia de Zn. Se ha reportado también que, en plantas cuyo contenido de Zn es deficiente, ocurre un incremento en la permeabilidad de las membranas de las células de la raíz respecto al P, al Cl y al B. Se considera, por tanto, que en muchos casos una 'deficiencia' de Zn es el efecto de un desequilibrio en la concentración de otros elementos.

La concentración de Zn que se considera nivel crítico del elemento en las hojas es de 10 ppm para Tanaka et al. (1969) y de 20 ppm para Yoshida et al. (1976). Katyal (1972) propone un nivel crítico de 25 ppm en la 'paja' (hojas secas) del arroz en la fase de maduración.

Se ha demostrado (Marschner, 1996) que, en sitios específicos de síntesis proteica de los tubos del polen, hay una necesidad grande de Zn: el contenido de este elemento en el ápice de crecimiento del tubo fue de 150 µg/g, y en la zona basal del tubo, de 50 µg/g.

Síntomas de deficiencia
La planta de arroz con deficiencia de Zn presenta los siguientes síntomas:

- En las hojas jóvenes, en las primeras 4 semanas después del trasplante, clorosis en la base de las hojas y hojas pequeñas (junto con retraso en el crecimiento de los tallos).
- En las hojas viejas, una especie de quemazón junto con áreas cloróticas que luego se tornan blancas (el síntoma se extiende desde la vaina hasta la nervadura central).
- En los casos severos, la base de la lámina foliar y las nervaduras intermedias adquieren una coloración blanca (Ordoñez et al., 1995).

Cobre: importancia en la planta

Las plantas toman pequeñas cantidades de cobre (Cu) como catión divalente (cúprico, Cu^{2+}) en los suelos aireados, y como catión cuproso (Cu^{+}) si el suelo está inundado o mal aireado. La forma divalente configura quelatos fácilmente con varios componentes de la solución del suelo o de una solución nutritiva.

La mayor parte del Cu absorbido por la planta se localiza en los cloroplastos, donde participa en procesos de oxidación–reducción en tres sistemas importantes, lo que le da un carácter de elemento esencial:

- Es un componente de la plastocianina, proteína presente en los cloroplastos que está involucrada en el transporte de electrones entre el fotosistema I y el fotosistema II.
- Es también componente de la enzima citocromo C-oxidasa, presente en la respiración, la cual cataliza la transferencia de electrones hasta el oxígeno en las crestas de las mitocondrias.
- Hace parte del complejo enzimático fenolasa, que oxida los fenoles; se relaciona así con la síntesis de la lignina porque forma algunos de sus precursores. Una de las consecuencias de la deficiencia de Cu es, por ello, la reducción de la lignificación y la acumulación de fenoles; lo mismo ocurre con la deficiencia de B.

Deficiencias

Los síntomas de deficiencia de Cu no son muy comunes en las plantas de arroz porque ellas requieren este elemento en cantidades pequeñas. La deficiencia de Cu, cuando ocurre, afecta el fruto (el grano) y la semilla, más que el crecimiento vegetativo de las plantas (Marschner, 1996). Puesto que es un elemento poco móvil que tiende a acumularse en el aparato mitocondrial y en las semillas, puede ocasionar síntomas de deficiencia (en el arroz y en otros cultivos) como los siguientes:

- Las hojas jóvenes adquieren una coloración verde oscura.
- Hay necrosis de tejidos en el ápice de las hojas, y ésta progresa a lo largo del margen foliar.
- Disminuye la formación de espigas o panículas (en algunos cereales).
- Hay daños en la formación del polen y en el proceso de fertilización en la planta de arroz, cuando en ésta coinciden un contenido bajo de carbohidratos y una deficiencia de Cu.
- Aumenta la cantidad de aminoácidos y se paraliza la función proteica en las células, lo que indica que el Cu es activador de las enzimas que participan en la síntesis de los ácidos nucleicos (Navarro, 2000).

Se ha demostrado que las aplicaciones de N acentúan la deficiencia de Cu; este resultado indicaría que un porcentaje muy alto de este elemento es 'secuestrado' en aminoácidos y en proteínas, dada su incorporación en estas moléculas complejas de los tejidos maduros de las plantas.

Manganeso: importancia en la planta

El manganeso (Mn) es asimilado por las plantas como catión divalente (Mn^{2+}), producto de la reducción de los óxidos de Mn no asimilables (Salisbury y Ross, 1994; Marschner, 1996; Ascon Bieto y Talon, 2000).

El Mn funciona como activador de cerca de 35 enzimas, entre ellas la peroxidasa, la oxidasa y la deshidrogenasa málica. No forma quelatos fácilmente y su comportamiento y funciones son similares a los del Ca y del Mg y también a los de otros metales (Fe y Zn). Su función principal consiste en la habilidad que tiene para cambiar de estados de oxidación (acepta y cede electrones) (Burnell, 1988, citado por Marschner, 1996).

Otras funciones principales del Mn se relacionan con el transporte de electrones; por ejemplo:

- En la reacción de Hill o fotólisis del agua, está presente en el complejo Mn-proteína que transporta electrones del agua al fotosistema II, reacción que requiere, por lo menos, cuatro átomos de Mn.
- En la enzima Mn-superóxido dismutasa (Mn-SOD), una enzima del grupo SOD presente en las mitocondrias, los peroxisomas y los cloroplastos de algunas especies vegetales.

El Mn participa también en la activación de enzimas; por ejemplo:

- En las enzimas que intervienen en la fijación del N.
- En las enzimas respiratorias del ciclo de Krebs (la descarboxilasa y las deshidrogenasas), aunque puede ser reemplazado en esa función por otros cationes divalentes, como el Mg^{2+}.
- En la AIA oxidasa y en la síntesis de proteínas, carbohidratos y lípidos.
- En el conjunto de enzimas (otras van con Fe, Cu o Zn) que protegen las plantas de los radicales superóxido (O_2^-) que se forman en muchas

reacciones enzimáticas (Marschner, 1996; Salisbury y Ross, 1994; López, 1998; Ascon Bieto y Talon, 2000; Navarro, 2000).

Deficiencia
Es raro encontrar síntomas de deficiencia de Mn en el arroz. Cuando la concentración del elemento es inferior a 20 ppm en los tejidos de la planta, puede ser deficiente (Yoshida et al., 1976). Se ha observado que si la deficiencia de Mn es severa, el volumen de clorofila tiende a disminuir y esto afecta seriamente la actividad fotosintética.

El arroz tolera mucho la concentración alta de Mn en la solución del suelo; por consiguiente, no es frecuente encontrar toxicidad de Mn en este cultivo. En ciertas especies cultivadas, esta tolerancia (Marschner, 1996) depende de factores del medio ambiente como la temperatura y la presencia abundante de Si en el suelo.

Molibdeno: importancia en la planta

El molibdeno (Mo) es el elemento que las plantas requieren en menor cantidad, si se compara con los demás nutrientes. Su carácter esencial se demostró (Gupta y Basuchadhuri, 1974, citados por Sanzo, 1985) al observar que las aplicaciones del elemento contribuían a aumentar la concentración de N en varias partes de la planta de arroz; este efecto permite inferir que el Mo es un activador de la enzima reductasa de nitratos, que interviene en la reducción de los iones nitrato a iones nitrito. Se cree también que el Mo participa en la transformación de formas inorgánicas de P en formas orgánicas de ese elemento.

Nitrogenasa
El Mo se encuentra en solución acuosa como oxi-anión MoO_4^{-2}. Hace parte estructural de algunas enzimas como la nitrogenasa y la nitrato reductasa, la deshidrogenasa y, posiblemente, la reductasa de los sulfitos; en ellas, el elemento cumple dos funciones: la estructural y la catalítica (Marschner, 1996).

La enzima nitrogenasa es importante porque participa en la fijación biológica del N. Esta enzima consta de dos proteínas diferentes: la ferroproteína y la ferro-molibdeno-proteína, que lleva dos átomos de Mo en su estructura.

Deficiencia
Aunque poco se ha estudiado este nutriente, se conocen los siguientes efectos de su deficiencia en las plantas de arroz:

- Afecta la formación del grano de polen.
- Reduce la capacidad de las anteras para producir polen.

Puesto que el Mo es muy móvil cuando se transporta por el floema, es posible corregir rápidamente su deficiencia haciendo aplicaciones foliares.

Boro: importancia en la planta

Las plantas toman el boro (B) como HBO_3^{-2} y $H_2BO_4^{-}$. El B actúa en los puntos de crecimiento o meristemas apicales en los procesos de expansión del material genético. Tiene un papel importante en la síntesis de las estructuras de protección, que son ricas en lignina, como la celulosa y demás polisacáridos constitutivos de la pared celular. El B es importante en el metabolismo de los fenoles y en la producción de los polifenoles que dan por resultado la lignina, acción en que interviene el B, el Mn y el Cu. Hasta ahora no se le conoce ninguna función estructural en las plantas (Bonilla et al., 1994).

Entre las principales funciones del B están su intervención en los siguientes procesos: el metabolismo de los azúcares, el incremento de la respiración, la germinación del polen, la regulación de la absorción de agua por la célula, el metabolismo del N, y el equilibrio de la oxido-reducción en las células. El B tiene un papel importante en el metabolismo de los carbohidratos: forma el complejo glucosa-6-fosfato-borato, que no se puede metabolizar y, por ello, bloquea el ciclo de las pentosas.

Hay otros efectos asociados con la presencia o ausencia de B en la planta, que todavía no se pueden analizar en términos de reacciones bioquímicas específicas. Por ejemplo, los puntos de crecimiento de tallos y raíces detienen el crecimiento cuando se presenta una deficiencia de B; si ésta es severa, hay decoloración de esas partes, desorganización de sus tejidos y, finalmente, su muerte. Estos síntomas sugieren un efecto del B en el metabolismo del ARN.

El B está relacionado con el Ca en la síntesis de la pared celular y está presente en la estructura de la lámina media de dicha pared (López, 1998). Si el equilibrio entre el Ca y el B se perturba porque hay una deficiencia de B, la planta se deforma; si ese desequilibrio ocurre por escasez de Ca o por exceso de B, es probable que se observen síntomas de toxicidad debida al B (Bonilla et al., 1994).

Se ha sugerido además que el B es necesario en el proceso de polimerización de la lignina; ahora bien, dado que existe una relación entre el contenido de flavonoides y la producción de lignina, es posible que el B esté estrechamente asociado con la biosíntesis de flavonoides. Los resultados de un estudio hecho en las leguminosas sobre el efecto de la escasez de B en el crecimiento vegetativo y en la producción de grano demostraron que el B se necesita principalmente para mantener la división celular en los puntos de crecimiento apical. El crecimiento vegetativo no depende directamente del suministro de B; sólo lo necesita en condiciones muy precisas y limitadas.

Deficiencia

Los síntomas comunes de la deficiencia de B son la muerte de los ápices caulinares y radiculares y la caída de las flores; éstos son puntos de elevada actividad metabólica. Los primeros síntomas aparecen en las partes jóvenes de las plantas. Los brotes terminales presentan rosetas, cambios de color y poco desarrollo. En algunos casos, la muerte de las yemas terminales favorece la formación de yemas laterales, las cuales se desarrollan y dan a la planta un aspecto cespitoso. Las hojas más jóvenes presentan formas irregulares, se arrugan y a menudo se engruesan, toman un color azul oscuro y muestran signos de marchitamiento y manchas cloróticas. Los tallos se agrietan y exhiben una superficie escamosa; se forma material suberoso dentro y fuera de ellos. Las raíces se vuelven viscosas, son más gruesas y en sus extremos hay tejidos necróticos.

Se ha sugerido que los síntomas de la deficiencia de B son, en realidad, síntomas de deficiencias de glúcidos, por la siguiente razón: las regiones de la planta donde la actividad metabólica es elevada necesitan grandes cantidades de azúcares y, si hay deficiencia de B en ellas, son las primeras en ser afectadas porque sin B no funciona bien la síntesis de azúcares (Bonilla et al., 1994).

Son pocos los casos de deficiencia de B en las plantas de arroz. Se ha observado, además, que una

concentración de B superior a 1.5 ppm en el agua de riego puede ser tóxica para un cultivo de arroz (Sanzo, 1985).

Relaciones entre los nutrientes

En el cultivo del arroz (y en todos los cultivos), una nutrición adecuada implica un ***equilibrio*** en las cantidades de los diferentes nutrientes que se aplican al suelo y que tomará la planta. Un desequilibrio en esta relación de nutrientes puede ser causa directa de la presencia de insectos plaga y de la susceptibilidad de las plantas a las enfermedades, lo que afectará, sin duda, el rendimiento final del cultivo.

Muchos síntomas de deficiencia son, en realidad, ***desequilibrios*** en las relaciones entre nutrientes, y no indican, necesariamente, una concentración del nutriente inferior a la considerada normal para un determinado período de crecimiento o estado fenológico de la planta. Conviene recordar que, en esas relaciones, influye mucho el *sinergismo* o el antagonismo que exista entre algunos elementos nutritivos.

Un programa de nutrición vegetal y, por tanto, de fertilización del suelo, empieza estudiando el estado de los nutrientes en el suelo. Un ***análisis de suelo*** y la consulta a la literatura especializada dan una idea de las relaciones que existen entre los nutrientes en el suelo. Ahora bien, la relación entre nutrientes que interesa realmente al cultivador es la que existe en las plantas, y ésta se conoce sin dificultad mediante un ***análisis de tejido***. Muchos ensayos y trabajos hechos con el arroz han establecido una relación adecuada de los nutrientes a nivel foliar, que varía bastante según el tipo de suelo, la región, la variedad sembrada, la edad del cultivo, las prácticas de manejo del cultivo y la época de siembra.

Algunas de las relaciones importantes entre ***microelementos***, principalmente, estudiadas hasta ahora (que se dan en el arroz y en otros cultivos) se enumeran a continuación:

- Entre el Ca y el Cu: si la planta es deficiente en Cu, puede inhibirse el transporte de Ca a los tejidos nuevos que están en crecimiento.
- El Mn afecta la absorción de Mg por la planta.
- La deficiencia de Fe puede inducir una toxicidad debida al Cu.
- Si el contenido de P y el de B en la planta son altos, se producen a menudo (como efecto secundario) síntomas de deficiencia de Zn.
- El Mg y el Fe pueden inducir una deficiencia de Zn.
- Hay también relaciones entre el Mo y el N, entre el Mo y el S, entre el Si y el Zn, entre el Si y el Mn, y entre el Si y el Fe; una aplicación de Si, por ejemplo, puede causar la desorción del P.

Hay también relaciones (positivas y negativas) entre los ***macronutrientes***; por ejemplo:

- Entre el N y el P; entre el N y el K.
- Entre el N, el P y el K; entre el Ca y el Mg.
- Entre el Ca, el Mg y el K.

Estas relaciones, y otras más que han sido observadas, deberían estudiarse con mucho cuidado antes de iniciar la fertilización de cualquier cultivo.

Referencias bibliográficas

Ascon Bieto, J.; Talon, M. 2000. Fundamentos de fisiología vegetal. McGraw Hill, Madrid. 515 p.

Bergmann, W. 1992. Nutritional disorders of plant development: Visual and analytical diagnosis. Jena, Fisher Verlag.

Bieleski, R.L.; Ferguson, I.B. 1983. Physiology and metabolism of phosphate and its compounds. In: Encyclopedia of plant physiology. Lauchli, A.; Bieleski, R.L. (eds.). Springer–Verlag, Berlin. v.15 A, p. 442-449.

Bonilla, C.R.; García, A.; Castillo, L.E.; Salazar, F.E. 1994. Boro y zinc, dos elementos limitantes en Colombia. Instituto Colombiano Agropecuario (ICA), Palmira. 50 p.

Brownell, P. 2000. Nutrición mineral y fisiología de las plantas. In: Salisbury, F.B.; Ross, C.W. (eds.). Fisiología de las plantas y bioquímica vegetal. Thomson, Madrid. p. 191.

Buckman, H.O.; Brady, N.C. 1960. The nature and properties of soils. Macmillan, Nueva York. p. 567.

Cadena, M.E. 2003. Relación del magnesio con el potasio y el calcio en la interfase ['suelo derivado de cenizas volcánicas'–'raíces de plantas de café']. Tesis (Doctorado). Universidad Nacional de Colombia, Sede Palmira. p. 18.

Calvin, M. 1954. Fijación de dióxido de carbono y síntesis de carbohidratos. In: Salisbury, F.B.; Ross, C.W. (eds.). Fisiología de las plantas y bioquímica vegetal. Thomson, Madrid. 385 p.

Castilla, L.A.; Reyes, L.A. 2003. Dosis y épocas de aplicación de nitrógeno en Fedearroz 50. Arroz (Colombia) 51(444, mayo-junio).

Clavijo-Porras, J. 1994. Metabolismo de nutrientes en las plantas: Fertilidad de suelos, diagnóstico y control. Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo, Bogotá, Colombia. p. 13-28.

Crawford, N.M.; Kahn, M.L.; Leustek, T.; Long, S.R. 2000. Nitrogen and sulfur. In: Buckanan, B.B.; Gruissem, W.; Jones, R.L. (eds.). Biochemistry and molecular biology of plants. American Society of Plant Physiologists, Rockville, ML, EE.UU. p. 786-849.

Fernández, P.R.; Vergara, B.S.; Yapit, N.; García, O. 1978. Crecimiento y etapas de desarrollo de la planta de arroz. Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), Cali, Colombia. 29 p.

Foyer, C.; Spencer, C. 1986. The relationship between phosphate status and photosynthesis in leaves: Effects of intracellular orthophosphate distrubution, photosynthesis and assimilate partitioning. Planta 167:369-375.

Galeano, S. 1991. Análisis de plantas y metodologías: Fundamentos para la interpretación de análisis de suelos, plantas y aguas para riego. Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo, Bogotá, Colombia.

González F., J. 1985. Origen, taxonomía y anatomía de la planta de arroz (*Oryza sativa* L.). In: Tascón, E.; García, E. (eds.). Arroz: Investigación y producción. Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT) y Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD), Cali, Colombia. p. 47-64.

Howeler, R.H. 1974. Anaranjamiento y toxicidad de hierro en arroz con riego en los Llanos Orientales de Colombia. In: Memorias del Segundo Seminario Técnico de Fedearroz. Federación de Arroceros de Colombia, Villavicencio, Colombia.

Jenner, C.F. 1982. Storage of starch. In: Plant physiology; Plant carbohydrates 1: Intracellular carbohydrates. Springer Verlag, Berlín.

Katyal, J.C. 1972. A study of zinc equilibria in flooded soils and amelioration of zinc deficient soils of Agusan del Norte. Terminal report. International Rice Research Institute (IRRI), Los Baños, Filipinas. 115 p.

Kinzel, H. 1989. Calcium in the vacuoles and cell walls of plant tissue. Flora 182:99-125.

Kramer, J.P. 2000. Estudios sobre el agua, los minerales y las raíces. In: Salisbury, F.B.; Ross, C.W. Fisiología de las plantas y bioquímica vegetal. Thomson, Madrid. p. 193.

López, Y. 1998. Funciones e interacciones de los elementos menores en plantas y suelos. In: Silva, F. (ed.). Actualidad y futuro de los acronutrimentos en la agricultura. Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo (SCCS), Bogotá, Colombia. 187 p.

Marschner, H. 1996. Mineral nutrition of higher plants. Institute of Plant Nutrition, University of Hohenheim (Alemania). Academic Press, Londres. 889 p.

Mohr, H.; Schopfer, P. 1995. Plant physiology. Springer-Verlag, Berlín. 650 p.

Navarro, G. 2000. Los elementos químicos y la vida vegetal. In: Química agrícola. Mundi Prensa, Madrid. p. 135-144.

Noggle, G.R.; Fritz, G.J. 1976. Introductory plant physiology. Prentice Hall, New Jersey. 630 p.

Ordóñez, J.R. 2003. Extracción de nutrientes de las variedades Fedearroz 50 y Fedearroz 2000 en el piedemonte llanero. Arroz (Colombia) 51(447):15-19.

Ordóñez, J.R.; Salive, A; Castilla, L.A.; Medina, J.H.; Riobueno, C.M.; Pérez, C.; Muñoz, M. 1995. Fertilización con boro, zinc y cobre en arroz. Federación Nacional de Arroceros (Fedearroz), Bogotá, Colombia. 21 p.

Perdomo, M.A.; González, J.; Galvis, Y.C. de; García, E.; Arregocés, O. 1985. Los macronutrimentos en la nutrición de la planta de arroz. In: Tascón, E.; García, E. (eds.). Arroz: Investigación y producción. Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT) y Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD), Cali, Colombia. p. 103-132.

Quesada, M.; Fabre, L.; Sanzo, R.; Saborit, R.; Muñiz, O. 2002. Respuesta del cultivo de arroz a la aplicación de silicato de calcio. In: Memorias del Segundo Encuentro Internacional de Arroz reunido en La Habana, Cuba, julio de 2002. Instituto de Investigaciones del Arroz, La Habana, Cuba.

Riobueno, A.M. 2003. Respuesta de Fedearroz 2000 a la fertilizción con azufre. Arroz (Colombia) 51(445, julio-agosto).

Rodríguez, O. 1985. Absorción y distribución de los macronutrientes en la planta de arroz. El Arrocero (Nicaragua) 3(7):3-10.

Salisbury, F.B.; Ross, C.W. 1994. Fisiología vegetal. Editorial Iberoamérica, México. 759 p.

Salisbury, F.B.; Ross, C.W. 2000. Enzimas, proteínas y aminoácidos. In: Salisbury, F.B.; Ross, C.W. Fisiología de las plantas y bioquímica vegetal. Thomson, Madrid. p. 321.

Sanzo, M. 1985. Los microelementos y el cultivo del arroz. Ministerio de Agricultura, La Habana, Cuba.

Tanaka, A.; Kawano, K.; Ramuguchi, N. 1966. Photosynthesis, respiration and type of tropical rice plant. Boletín Técnico del IRRI. International Rice Research Institute (IRRI), Los Baños, Fililpinas. 7 p.

Wolt, J.D. 1994. Soil solution chemistry: Applications to environmental science and agriculture. John Wiley, Nueva York. 345 p.

Yamakawa, Y.; Saigusa, M.; Okada, M. 2000. Nutrient uptake by rice and soil solution composition under atmospheric CO_2 enrichment. Plant and Soil 259(1-2):367-372.

Yoshida, S. 1972. Physiological aspects of grain yield. Annual Review of Plant Physiology 23:437-464.

Yoshida, S. 1978. Tropical climate and its influence on rice. IRRI Research Paper Series 20. International Rice Research Institute (IRRI), Los Baños, Filipinas. 25 p.

Yoshida, S. 1981. Fundamentals of rice crop science. International Rice Research Institute (IRRI), Los Baños, Filipinas. p. 112-176.

Yoshida, S.; Navasero, S.; Ramírez, E. 1976. Effects of silica and nitrogen supply on some leaf characters of the rice plant. International Rice Research Institute (IRRI), Los Baños, Filipinas.

Capítulo 18

Diagnóstico de problemas de fertilidad de suelos: Visión actual

Carlos A. Flor

Contenido

	Página
Resumen	336
Abstract	337
Introducción	337
Aspectos básicos del diagnóstico	338
Definiciones	339
Causalidad	339
Planta y cultivo	341
Situaciones específicas	341
Respecto al suelo inundado	341
Respecto al genotipo de arroz	342
Respecto a los nutrientes	342
Respecto a los desórdenes nutricionales	343
Caracterización visual de los síntomas	344
Por deficiencia	344
Por toxicidad	345
Según el suelo	346
Referencias bibliográficas	347
Anexo: Guía para interpretar el análisis químico de suelos para el cultivo del arroz, en la que se sugieren tres rangos o niveles para ubicar los datos analíticos reales y tres texturas correspondientes	349

Resumen

Se revisa y enfatiza la importancia de un '*diagnóstico acertado*' como fundamento de un '*tratamiento correcto*', tanto en la fertilidad del suelo como en otros problemas del cultivo de arroz. El diagnóstico de los desórdenes nutricionales del cultivo de arroz presenta aspectos relevantes y debilidades, tanto en el sistema de secano como en el sistema de riego e inundación del terreno. En este último, conviene hacer énfasis en que una situación de deficiencia o de toxicidad en las plantas, por causa de un nutriente, es afectada por las reacciones de reducción que experimentan los nutrientes en ausencia de oxígeno; estas reacciones son típicas de la química de los suelos inundados. Se describen y analizan las diversas etapas del diagnóstico: clínica, preliminar, avanzada y final, y se presenta una guía para caracterizar visualmente los síntomas de los desórdenes nutricionales. Al mismo tiempo, se sugiere construir cuadros de sintomatología que representen el mayor número posible

de estos desórdenes nutricionales, y que sirvan para sustituir la representación clásica del síntoma, la cual consiste, generalmente, en una hoja de arroz con una sola manifestación del desorden. Estos cuadros sintomatológicos podrán caracterizar deficiencias dobles y triples, así como la combinación de deficiencias y toxicidades.

Abstract

Diagnosis of soil fertility problems: Current vision

The importance of a '*correct diagnosis*' of soil fertility and other problems faced by the rice crop as the basis of a '*correct treatment*' is reviewed and highlighted. The diagnosis of nutritional disorders of rice crops indicates that there are common aspects and weaknesses in both upland and irrigated (flooded) crops. In the case of irrigated rice, any situation of nutrient deficiency or plant toxicity due to a given nutrient is affected by the reductive reactions that nutrients undergo in the absence of oxygen; these reactions are typical of the chemistry of flooded soils. The different stages of diagnosis—clinic, preliminary, advanced, and final—are described and analyzed. Guidelines are also provided for visually characterizing symptoms of nutritional disorders and it is suggested to prepare symptomatology tables that contain the highest number possible of nutritional disorders. These tables can be used to replace the classical representation of symptoms, which generally consists of one rice leaf with a single manifestation of the disorder, and to characterize double and triple deficiencies as well as combined deficiencies and toxic effects.

Introducción

Los investigadores de la fertilidad del suelo se han orientado, principalmente, hacia la solución de problemas debidos al nitrógeno, al fósforo y a la acidez del suelo. Esta orientación refleja la importancia que tienen estos tres problemas para la producción de arroz o la prioridad que, de hecho, se les da. Pues bien, esta situación presenta puntos fuertes y débiles que se consideran enseguida.

Las soluciones dadas a esos problemas han permitido obtener un rendimiento muy alto y muy estable de este cultivo. Ahora bien, cuando estos problemas reciben el '*tratamiento correcto*' apoyado en un '*diagnóstico acertado'*, han sido objeto de uno de los componentes más valiosos de la tecnología de avanzada (diagnóstico + tratamiento) de que dispone actualmente el cultivo de arroz. Un resultado de la correcta aplicación de esta tecnología ha sido, en Colombia, el rendimiento experimental de dos variedades, Fedearroz 50 y Fedearroz 2000, que es del orden de 8800 kg/ha (Ordóñez, 2003).

Los éxitos antes mencionados contrastan con las debilidades que se perciben en el manejo de los nuevos genotipos y de las nuevas variedades en ambientes específicos. Hay, por ejemplo, deficiencias de micronutrientes y hace falta precisar '*niveles críticos puntuales*' en los análisis de suelos; esta última información servirá de base a los técnicos para que puedan establecer una posible deficiencia o toxicidad de esos nutrientes. Es necesario, por tanto, intensificar el trabajo de conjunto entre los especialistas en suelos y en nutrición vegetal, de un lado, y los fitomejoradores, del otro.

Es urgente también proporcionar a técnicos y productores de arroz la información que requieran sobre el manejo de los desórdenes nutricionales más frecuentes, cuando éstos se presentan en forma

simultánea. Hay suficiente información para diagnosticar, por separado, las deficiencias de nitrógeno, fósforo, magnesio y zinc. Sin embargo, hay que intentar caracterizar, al menos, las *dobles deficiencias* más relevantes. Por ejemplo, explicar la forma en que se presenta, en el campo, la deficiencia doble de fósforo y zinc. La comprensión más realista de este problema requiere, en algunas zonas de producción de arroz, la consideración del complejo de deficiencias y toxicidades más importantes. Una de ellas es la toxicidad que causa el aluminio de los suelos ácidos en las plantas de arroz.

La caracterización visual de la fertilidad del suelo es una parte del diagnóstico que, aunque compleja, es interesante y merece ser explorada. Es la primera ayuda que tiene el investigador o el productor para tomar alguna decisión sobre la fertilización que requiera un proyecto de producción de arroz.

Los denominados 'síntomas típicos' del diagnóstico clásico, que se representan, generalmente, en las publicaciones agrícolas con la fotografía de una hoja, son todavía útiles, pero deben darle paso a las ayudas modernas de tipo electrónico o aun más avanzadas. Hay que tratar de aproximar los diferentes síntomas de la fertilidad del suelo, sean éstos de naturaleza morfológica, fisiológica, bioquímica o genética. Esto significa que es preciso *integrar* los síntomas morfológicos visibles de la fertilidad (como la clorosis o el enanismo) con sus manifestaciones de naturaleza química (una disminución del contenido de azúcares) y con las expresiones de naturaleza fisiológica (la desactivación de las reacciones de la fotosíntesis y, en consecuencia, la reducción de los fotosintatos).

Este conjunto de manifestaciones constituye el concepto moderno de *cuadro sintomatológico* o *síndrome* de la fertilidad del suelo, el cual se presenta aquí como una alternativa al concepto clásico de 'conjunto de síntomas típicos'. Se recomienda, por tanto, la elaboración de cuadros *fotográficos* de la sintomatología, que contengan el mayor número posible de síntomas visibles de los problemas de fertilidad.

El *análisis de tejidos* se reduce, casi siempre, a un 'análisis de hojas', que carece, generalmente, del nivel crítico necesario (y actualizado) para tomar decisiones de carácter correctivo. Rara vez podrían aplicarlo los técnicos agrícolas para decidir, en la práctica, un plan de fertilización relacionado con la producción de arroz o de otro cultivo. No obstante, el denominado 'análisis de tejidos' sirve para establecer, según las etapas de desarrollo del cultivo, los requerimientos nutricionales de las plantas, y para determinar la mejor 'época' de aplicación de algunos nutrientes.

Los investigadores deben apoyar a los técnicos y a los productores de arroz suministrándoles información mediante programas ('software') y archivos de computador, que les permitan simplificar la interpretación de los análisis químicos del suelo y las recomendaciones que ellos han solicitado o recibido.

Aspectos básicos del diagnóstico

Se enfatiza en este capítulo la importancia de un '*diagnóstico acertado*' como fundamento de un '*tratamiento correcto*', tanto en la fertilidad del suelo como en otros problemas del cultivo de arroz. Por ejemplo, el diagnóstico de la deficiencia grave de zinc en algunos suelos del valle geográfico del río Cauca, en Colombia, y el tratamiento que se le dio marcaron la diferencia entre el fracaso y el éxito para los productores de arroz y de otros cultivos que aceptaron esas ayudas (Flor et al., 1975).

Los Oxisoles y los Ultisoles, tipos de suelo predominantes en los Llanos Orientales de Colombia, se han caracterizado por su extremada acidez y por su mineralogía dominada por la caolinita y por los óxidos e hidróxidos de hierro y de aluminio. Esta caracterización permite lograr excelentes diagnósticos de los problemas de fósforo y aluminio de estos suelos (Friesen et al., 1994).

Definiciones

¿Qué es exactamente un diagnóstico? Etimológicamente, la palabra deriva de las raíces griegas 'gnosis' (conocimiento) y 'dia' (a través de). Según Font-Quer (1977), el diagnóstico "es el conjunto de signos o síntomas que sirven ['dia'] para caracterizar ['gnosis'] una enfermedad"; lo considera también, en su función adjetival, como algo propio de la diagnosis o que se refiere a ella.

Esta definición corresponde, principalmente, a la patología vegetal en sentido estricto. Un concepto más amplio del diagnóstico y de su aplicación debe incluir, como causa posible de los problemas agrícolas que enfrenta, los factores bióticos y abióticos relacionados con la producción del cultivo y las interacciones que se dan entre esos factores.

Se propone en este capítulo una definición más simple:

> Diagnóstico es el proceso en que se intenta definir un problema mediante el conocimiento de los agentes primarios que lo causan (las causas), tanto bióticos como abióticos, y de las interacciones surgidas entre ellos.

En esta definición, el problema y sus causas son del ámbito agrícola.

Tanaka y Yoshida (1970) señalan que "el diagnóstico de un desorden nutricional en los vegetales es tan importante como difícil". En realidad, el diagnóstico, como definición de un problema, es una de las acciones más complicadas del trabajo de un investigador. El *diagnóstico preventivo* de la fertilidad de un suelo, que implica muestreos del suelo correctos y oportunos, su análisis, la interpretación de los resultados de éste y las recomendaciones pertinentes, es el punto de partida de un proceso de producción agrícola exitoso y la condición indispensable para tomar decisiones acertadas sobre ese proceso productivo.

Causalidad

La etiología (ciencia o tratado de las causas) estudia las técnicas empleadas en un diagnóstico y el proceso general que éste recorre. Uno de los objetivos de esta disciplina es conocer la naturaleza de los *agentes que causan* las 'enfermedades' o disfunciones, y las categorías en que ellos se clasifican. Existe todavía una tendencia, en el campo de la fitopatología, a asociar el concepto de 'enfermedad' con los agentes primarios que la causan, como los hongos, los virus o las bacterias; sin embargo, la concepción más amplia y cada vez más aceptada de la producción agrícola integral, antes mencionada, considera que los factores ambientales comunes, como el clima y el suelo, son causas importantes de los 'problemas' agrícolas. Una prueba clara de esta visión integral es que los pájaros, la poscosecha y el almacenamiento se consideran ya como causas de algunos problemas de la producción agrícola.

Un esquema del proceso de diagnóstico, enmarcado en la metodología convencional de la investigación agrícola, se presenta a continuación (Flor, 1985); es una visión general que puede aplicarse, en el campo, a los problemas de producción del arroz o de otros cultivos (Figura 1).

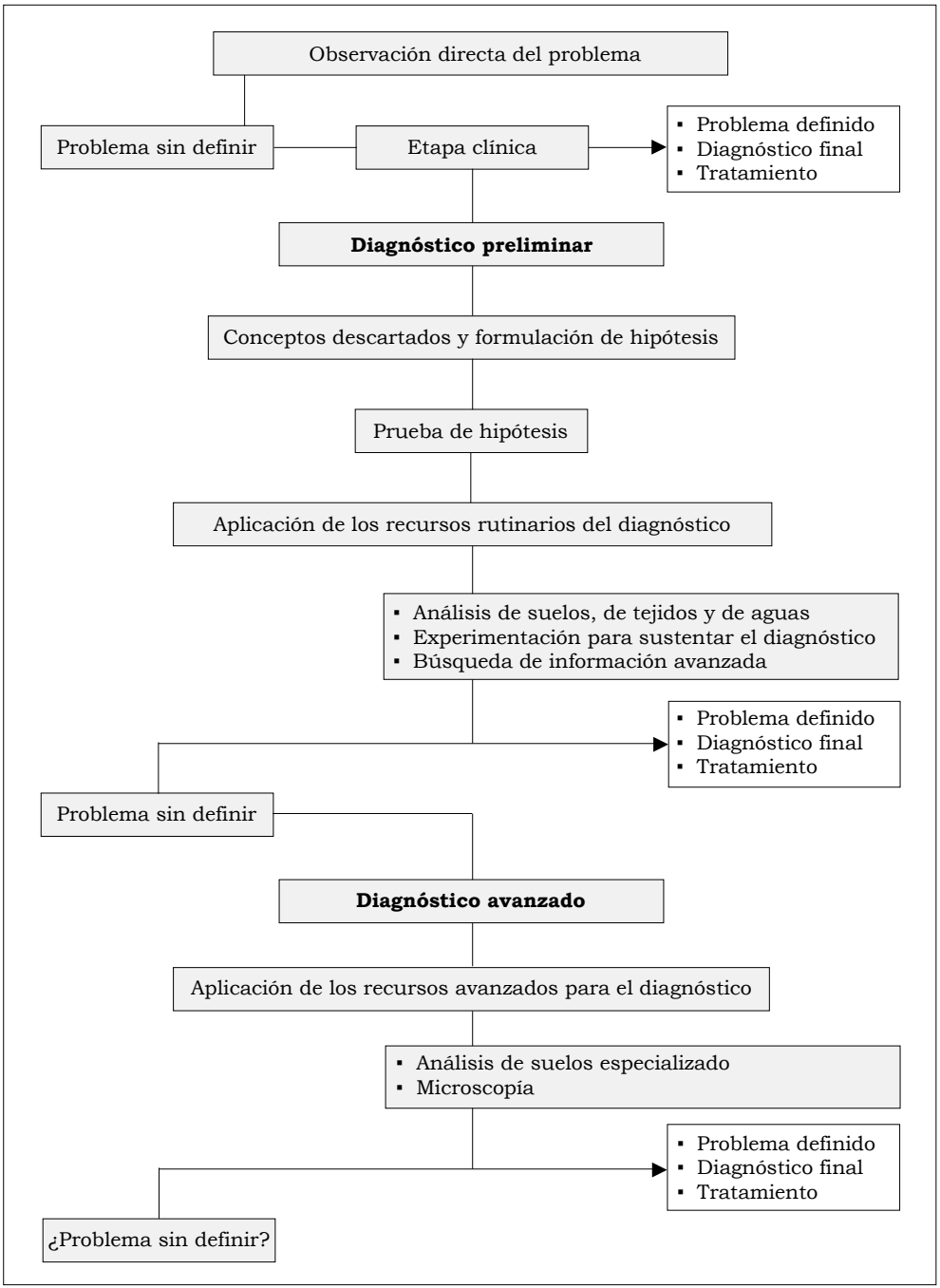


Figura 1. Diagrama que ilustra el proceso de diagnóstico de la fertilidad de un suelo.

Planta y cultivo

En los cultivos anuales (como el arroz), donde la densidad de población es alta, tienen interés los problemas que afectan el conjunto de las plantas, o sea, el cultivo. La planta individual no tiene relevancia, excepto en algunos trabajos de invernadero. Lo contrario ocurre en los cultivos perennes, como los cítricos: el problema nutricional de un individuo es, sin duda, importante.

La deficiente observación de las plantas individuales y de todo el cultivo es causa frecuente de un diagnóstico equivocado sobre algún problema del cultivo de arroz. La buena observación depende del conocimiento que se tenga de aspectos básicos de la morfología y la fisiología de la planta de arroz. Una recomendación elemental es la siguiente: si se tiene un conocimiento adecuado del 'estado normal' de las plantas de arroz, se podrán detectar más fácilmente, por diferencia o por contraste, las manifestaciones o síntomas de 'anormalidad' de esas plantas, no sólo respecto a la fertilidad sino a otros factores.

Situaciones específicas

Hay que considerar las siguientes situaciones del suelo y del cultivo que pueden influir en el diagnóstico de los problemas de fertilidad del cultivo de arroz:

Respecto al suelo inundado

1. El arroz se cultiva en el sistema de *secano* o en el sistema con *riego* e inundación. Ahora bien, las propiedades químicas, físicas y biológicas de un suelo seco cambian significativamente cuando el agua lo inunda.
2. La problemática de un suelo cultivado con arroz en condiciones de riego e inundación es diferente de la que presenta un suelo en que se cultiva arroz de secano:

   - En el suelo inundado predominan, químicamente hablando, las reacciones de *reducción*, que se caracterizan por la ausencia de oxígeno (es mínima la cantidad de aire disuelto en ese suelo).
   - La lámina de agua impide, además, el escape de *gases* y se acumulan, por tanto, el CO_2 y el NH_3, entre otros.

3. Las reacciones de reducción química varían según las condiciones específicas del suelo:

   "Cuando estas reacciones son muy fuertes, se agravan algunos desórdenes nutricionales, especialmente los relacionados con el exceso de hierro o de manganeso en el suelo, porque habría entonces una excesiva absorción de estos elementos" (Fryre, 1999).

4. Los principales cambios que ocurren en un suelo cultivado con arroz bajo el sistema con riego e inundación son los siguientes:

   - Cambio en el pH.
   - Disminución del potencial de reducción-oxidación (potencial redox).
   - Aumento de la conductividad eléctrica.
   - Incremento en la disponibilidad de hierro y de manganeso.

5. Cualquiera que sea el pH original del suelo, después de la inundación éste llega, aproximadamente en 3 semanas, a un valor situado entre 6.5 y 7.5.

   - Estos valores se mantienen mientras dure la inundación.

6. El arroz cultivado en un suelo inundado responde de manera diferente al encalamiento y a la fertilización que en un suelo cultivado en condiciones de secano.

Respecto al genotipo de arroz

7. El comportamiento de diferentes *genotipos* de arroz ante un mismo problema no es idéntico:

   "Los suelos de las sabanas latinoamericanas son, en su mayoría, muy ácidos y en ellos el complejo de intercambio del suelo se encuentra altamente saturado de aluminio (de 75% a 95% de saturación). El arroz no se desempeña bien en los suelos muy ácidos, y la toxicidad del aluminio fue un problema serio en el pasado. Ahora bien, los fitomejoradores del CIAT obtuvieron nuevos genotipos de arroz que toleran bien el aluminio; los mecanismos exactos de esa tolerancia no se conocen todavía" (Roy et al., 1997).

8. Cada genotipo de arroz tiene un requerimiento diferente, en términos cuantitativos, de los denominados nutrientes esenciales. Es decir, la cantidad (en kg/ha) de nitrógeno, fósforo, potasio, magnesio y otros nutrientes que requiere cierto genotipo de arroz para expresar su máximo potencial de rendimiento es diferente del que requiere un genotipo distinto. Son muy conocidos los informes de Perdomo et al. (1983) y de Fernández et al. (1985) sobre estos requerimientos diferenciales.

9. Se ha aceptado comúnmente (Perdomo et al., 1983) que el orden en que la planta, dadas sus necesidades de crecimiento y desarrollo, extrae los nutrientes del suelo (y los absorbe por las raíces), es el siguiente:

   Si → N → K → Ca → P → Mg → S (en SiO_2)

   Si se tienen en cuenta las investigaciones recientes (ver numeral 10), este orden debería modificarse.

10. Se ha informado (Ordónez, 2003) que el orden (o prioridad) de extracción de nutrientes para dos variedades colombianas (Fedearroz 50 y Fedearroz 2000) es el siguiente:

    - Para Fedearroz 50:
      K → N → Ca → Mg, S → P → Zn → B → Cu
      (igual)
    - Para Fedearroz 2000:
      N → K → Ca → P → S → Mg → B → Zn → Cu

Respecto a los nutrientes

11. El silicio es reconocido como un macronutriente del arroz (Winslow, 1993).

12. Se ha informado (Malavolta, 1976) que los nutrientes que necesita el arroz para crecer y desarrollarse (requerimientos nutricionales) y la cantidad requerida, en promedio, de cada uno son los siguientes:

Para recolectar		Requerimiento nutricional (kg/ha)					
Producto	Cantidad (t/ha)	N	P	K	Ca	Mg	S
Grano	4	20	13	9	3	3	11
Paja	40	100	8	70	30	30	–
Total	44	120	21	79	33	33	11

13. Otros investigadores (Romero et al., 1991; Castilla, 2001) consideran que la producción de 1 tonelada de arroz en los trópicos necesita las siguientes cantidades de nutrientes esenciales (en kg/ha):

Nutriente requerido	Cantidad
Nitrógeno	18 a 27
Fósforo	4 a 5
Potasio	15 a 35
Calcio	3 a 8
Magnesio	3 a 4
Azufre	1.5 a 2

14. Se ha informado (Ordóñez, 2003) de los siguientes promedios de extracción de nutrientes del suelo (en kg/ha) para las variedades de arroz, Fedearroz 50 y Fedearroz 2000:

Nutriente extraído	Cantidad (kg/ha)
Nitrógeno	213
Fósforo	33 a 37
Potasio	186 a 281
Calcio	100
Magnesio	22 a 39
Azufre	26 a 39

Estas cantidades extraídas corresponden a un rendimiento experimental, en promedio, de 8 t/ha. Es interesante comparar estos datos con los que menciona Malavolta (1976) para un rendimiento de arroz de 4 t/ha (ver numeral 12).

15. Todos los nutrientes esenciales deben estar presentes y disponibles en el suelo para que las plantas, absorbiéndolos, puedan expresar su máximo potencial de rendimiento; ahora bien, no todos los elementos que identifica un análisis de tejido son esenciales.

Respecto a los desórdenes nutricionales

16. Un desorden nutricional puede ser efecto de una de las dos relaciones siguientes entre los elementos nutritivos:

Antagonismo. Ocurre cuando la presencia de un ión de un nutriente (elemental o constituyendo un radical) reduce la absorción de un ión de otro nutriente.

Sinergismo. Ocurre cuando la presencia de un ión de un nutriente (elemental o como radical) aumenta la absorción de un ión de otro nutriente. Se han encontrado interacciones muy claras entre el calcio, el potasio y el magnesio en las condiciones del suelo de los Llanos Orientales de Colombia (Friesen et al., 1994).

17. En la capa de suelo denominada comúnmente 'horizonte A', la materia orgánica y los nutrientes se acumulan más que en otras capas o estratos. El zinc es uno de los micronutrientes esenciales que más se acumula en el horizonte A. Ahora bien, hay prácticas de preparación del suelo para el cultivo de arroz con riego, como la *nivelación*, que adelgazan esa capa o la remueven del todo; cuando así ocurre, es posible despojar el suelo de zinc, causando así una deficiencia del elemento en el cultivo.

Esta situación fue una experiencia real para el programa de mejoramiento genético del arroz, en el CIAT, cuando iniciaba sus investigaciones en el campo. El diagnóstico del problema y el tratamiento que se aplicó luego lograron superar la escasez de zinc en el terreno (Flor et al., 1975).

18. Un cultivo de arroz que padece de un desorden nutricional tiende a ser más susceptible a los organismos patógenos. Por ejemplo, el potasio en exceso establece un antagonismo con el nitrógeno, el boro y el manganeso, cuya absorción será deficiente; pues bien, habiendo escasez de estos últimos nutrientes, es más severo un ataque del hongo *Helminthosporium oryzae* (Castilla, 2001).

19. La movilidad de los nutrientes dentro de la planta es un aspecto del metabolismo vegetal que ayuda al diagnóstico de fertilidad:

    Muy móviles. El potasio y el magnesio, por ejemplo, por lo cual sus síntomas de deficiencia aparecen en las hojas inferiores de la planta.

    Poco móviles. El boro y el calcio, por ejemplo, y por eso sus síntomas de deficiencia aparecen en las hojas viejas y en las partes superiores de la planta.

    Los nutrientes que son importantes en los procesos metabólicos, como el nitrógeno (constitutivo de las proteínas), el fósforo (componente del ácido nucleico) y el azufre (componente del aminoácido cistina), manifiestan su deficiencia con igual severidad, tanto en las partes superiores como en las inferiores de las plantas.

20. Los problemas que experimenta la planta (nutricionales, de sanidad) pueden clasificarse en primarios y secundarios. Ahora bien, los síntomas de un problema secundario pueden *enmascarar* los de un problema primario. Por ejemplo, los síntomas de una enfermedad fungosa (secundario, accidental) pueden enmascarar los síntomas de un desorden nutricional (primario, funcional).

21. El diagnóstico de fertilidad del suelo basado en desórdenes nutricionales debe considerar también la posibilidad de una 'situación específica'. Por ejemplo, el 'anaranjamiento' de las hojas del arroz fue diagnosticado acertadamente por Howeler (1985) en los cultivos de arroz de los Llanos Orientales de Colombia.

Caracterización visual de los síntomas

Por deficiencia

Blanco et al. (1992) presentan la siguiente guía visual de los síntomas que muestran las plantas cuando son deficientes en algún nutriente:

- **Nitrógeno**
  "Las *plantas* con deficiencia de nitrógeno presentan un crecimiento retardado y un macollamiento reducido. Las *hojas* nuevas son más verdes, pero las *demás hojas* son angostas y cortas, de color verde pálido, y toman una posición erecta. Todo el *cultivo* puede adquirir un tono amarillento".

- **Fósforo**
  "Las *plantas* presentan una reducción del crecimiento y del macollamiento. Las *hojas jóvenes* toman un color verde oscuro, y son más erectas, cortas y angostas que las hojas normales. En algunas variedades de arroz, las *hojas más viej*as adquieren una coloración anaranjada o purpúrea".

- **Potasio**
  "Las *plantas* presentan una reducción del crecimiento y del macollamiento. Las *hojas superiores* son cortas y de color verde oscuro. Las *hojas inferiores* toman un color verde amarillamiento entre las nervaduras, que empieza en el ápice y continúa gradualmente hacia la base. En la lámina foliar de estas hojas aparecen a veces *manchas necróticas*".

- **Azufre**
  "Los síntomas de la deficiencia de este elemento son similares a los que causa la deficiencia de nitrógeno y diferenciarlos visualmente es casi imposible".

- **Calcio**
  "En las *hojas superiores*, el punto de crecimiento se torna blanco y se enrolla. La planta se vuelve raquítica y los puntos de crecimiento mueren".

- **Magnesio**
  "Cuando la deficiencia es moderada, la altura y el macollamiento de la *planta* se alteran levemente. Las *hojas* se vuelven onduladas y se doblan porque aumenta el ángulo que forman la lámina foliar y la vaina. En las *hojas inferiores* aparece una clorosis intervenal que se caracteriza por su tono anaranjado".

- **Manganeso**
  "En las *plantas* se reduce el crecimiento, pero el macollamiento es normal. Las *hojas* exhiben un listado intervenal que empieza en el ápice y avanza hacia la base de la hoja; esta parte adquiere más tarde un color marrón oscuro y sus tejidos, finalmente, mueren (necrosis)".

- **Zinc**
  "La deficiencia se manifiesta como blanqueamiento de la nervadura central de las *hojas*, especialmente en la base de las hojas emergentes. En las *hojas viejas* aparecen manchas de color marrón, que se agrandan y se juntan. El macollamiento y el crecimiento de la *planta* se reducen. Si la deficiencia es severa, las plantas mueren".

- **Cobre**
  "Las *hojas* toman un color verde azulino y sus tejidos mueren (necrosis) cerca del ápice; esta clorosis se desarrolla del ápice hacia la base de la hoja, avanzando a ambos lados de la nervadura central. Sigue luego la coloración marrón del ápice y la muerte de estos tejidos".

- **Hierro**
  "Las *hojas* se tornan completamente cloróticas y blanquecinas, incluyendo la hoja bandera".

- **Boro**
  "Las *plantas* tienden a perder peso, pérdida que se refleja en menos materia seca. En las *hojas* emergentes, las puntas se ponen blanquecinas. En los casos severos, los puntos de crecimiento se deforman, aunque sin afectar el macollamiento de la planta".

Por toxicidad

Blanco et al. (1992) describen los principales efectos tóxicos (síntomas) que el exceso de algunos elementos nutricionales puede causar en las plantas de arroz:

- **Hierro**
  Toxicidad directa
  "Pequeñas manchas de color marrón en las *hojas inferiores*; empiezan en el ápice de la hoja y luego toda la hoja se torna marrón. Cuando la toxicidad es severa, *todas las hojas* adquieren un color marrón púrpura y las inferiores mueren".

  El crecimiento de la *planta* se reduce y el número de macollas disminuye. El *sistema radical* se reduce y las raíces toman un color marrón oscuro".

- **Hierro**
  Toxicidad indirecta o 'anaranjamiento'
  "El color anaranjado de las hojas no indica exceso de hierro sino *escasez* de nitrógeno, fósforo, potasio y magnesio, por la siguiente razón: las raíces se cubren de una capa de compuestos de hierro en su forma oxidada (Fe^{+3}), la cual impide la absorción de los cuatro nutrimentos mencionados".

  "El *follaje* de las plantas se torna amarillento o anaranjado; el síntoma (denominado 'amarillamiento' o 'anaranjamiento') comienza en las hojas inferiores y se extiende a las superiores. En los casos graves, la mayoría de las hojas mueren".

- **Boro**
  "Las puntas de las *hojas más viejas* adquieren un color amarillento (amarillamiento), que se extiende a lo largo de sus márgenes. Aparecen luego grandes manchas elípticas de color marrón oscuro a lo largo de los márgenes de las *hojas*. Éstas y otras partes de la planta afectadas se tornan de color marrón y se marchitan".

- **Aluminio**
  "Las *hojas* presentan manchas blancas o amarillas intervenales; en los casos severos, las hojas se secan y mueren. Las *raíces* son cortas y escasas".

- **Manganeso**
  "El crecimiento de la *planta* se reduce y, a veces, se altera el macollamiento. Las *hojas más viejas* presentan manchas de color marrón. Las puntas de las *hojas* se secan. En las *panículas*, el porcentaje de esterilidad es alto".

Según el suelo

Cheaney y Jennings (1975) indican que algunas *condiciones de los suelos* conducirían a la aparición de una deficiencia o una toxicidad causada por los elementos antes mencionados (Cuadro 1).

Cuadro 1. Condiciones de los suelos que pueden favorecer la deficiencia o la toxicidad debida a varios elementos nutricionales en las plantas de arroz.

Elemento	Condición para deficiencia	Condición para toxicidad
Nitrógeno	Poca materia orgánica en el suelo	
Fósforo	Acidez alta del suelo	
Potasio	Suelo arenoso	
Hierro	Suelo con pH alcalino (alto) o neutro (alrededor de 7.0): común en cultivos de secano	Anegamiento del suelo (causa fuerte acidez del suelo: pH ≤ 5)
Manganeso	Suelo arenoso y permeable: común en cultivos de secano	Mal drenaje del suelo; en cultivos de secano
Aluminio		Acidez alta del suelo; en cultivos de secano

Referencias bibliográficas

Blanco, F.; Rico, G.; Amaya, A. 1992. Nutrición mineral, suelos y manejo de la fertilización en el arroz sembrado en Venezuela. Unidad de capacitación en producción de arroz no. 4. Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT) y Fondo Nacional de Investigaciones Agropecuarias (FONAIAP), Cali, Colombia. p. 21-25.

Castilla, L.A. 2001. Fertilización y nutrición, factores clave en el cultivo del arroz. In: Arroz (Colombia) 50(434):1-12.

Castilla, L.A.; Guzmán, M. 2002. Relación entre la nutrición y la presencia de enfermedades en la planta de arroz. Arroz (Colombia) 50(440):14-17.

Cheaney, R.; Jennings, P. 1975. Problemas en cultivos de arroz en América Latina. Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), Cali, Colombia. 91 p.

Fageria, N.K. 1980. Recomendacões para uso de fertilizantes fosfatados para cultura de arroz de sequeiro. Circular técnica no. 03. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA) y Centro Nacional de Pesquisa de Arroz e Feijão (CNPAF), Brasil. p. 69-76.

Fageria, N.K.; Barbosa-Filho, M.; Pereira, N. 1994. Deficiencias nutricionais na cultura do arroz: Identificação e correcto. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA) y Centro Nacional de Pesquisa de Arroz e Feijão (CNPAF), Brasil. p. 24-36.

Fernández, F.; Vergara, B.S.; Yapit, N.; García, O. 1985. Crecimiento y etapas de desarrollo de la planta de arroz. In: Tascón, E.; García, E. (eds.). Arroz: Investigación y producción. Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT) y Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD), Cali, Colombia. p. 83-101.

Flor, C.A. 1985. El diagnóstico de problemas en fríjol. In: Tascón, E.; García, E. (eds.). Fríjol: Investigación y producción. Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT) y Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD), Cali, Colombia. p. 385-399.

Flor, C.A.; Cheaney, R.; Sánchez, P. 1974. O problema da deficiencia do zinco no arroz. Lavoura Arrozeira (Brasil) 27(282):20-23.

Flor, C.A.; Howeler, R.; González, C.A. 1975. Zinc y boro, dos micronutrimentos limitativos para la producción de algunas cosechas en las regiones cálidas de Colombia. Documento CIAT. Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), Cali, Colombia. 23 p.

Font-Quer, P. 1977. Diccionario de Botánica. Labor, Barcelona. 1244 p.

Friesen, D.K.; Sanz, J.I.; Molina, D.; Rivera, M. 1994. Crop nutrition requirements and input use efficiency in Llanos Oxisols under crop rotations. In: CIAT Annual report 1994; Tropical lowlands program. Centro Interncional de Agricultura Tropical (CIAT), Cali, Colombia. p. 223-233.

Fryre, A. 1999. Problemas del arroz bajo inundación en suelos con fuerte reducción química. Revista Suelos Ecuatoriales (Colombia) 29(1):39-44.

Howeler, R.H. 1985. Anaranjamiento y toxicidad de hierro en arroz con riego en suelos ácidos. In: Tascón, E.; García, E. (eds.). Arroz: Investigación y producción. Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT) y Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD), Cali, Colombia. p. 149-156.

Malavolta, E. 1976. Manual de química agrícola, nutrición de plantas y fertilidad del suelo. Editora Agronómica Ceres, São Paulo, Brasil. 528 p.

Medina, J.H.; Castilla, L.A. 2001. Análisis de suelos como aporte a la nutrición del arroz. Revista Arroz (Colombia) 50(433):12-14.

Ordóñez, R. 2003. Extracción de nutrientes de las variedades Fedearroz 50 y Fedearroz 2000 en el piedemonte llanero. Arroz (Colombia) 51(447):12-13.

Perdomo, M.A.; González, J.; Cadavid, Y.; García, E. 1983. Los macro-nutrimentos en la nutrición de la planta de arroz. Guía de estudio (Arregocés, O., ed.). Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), Cali, Colombia. 36 p.

Romero, F.; Vizuete, P.; Paca, C.; Carranza, A. 1991. Uso eficiente de los fertilizantes en el cultivo del arroz en Ecuador. Unidad de aprendizaje no. 4 (para capacitación en tecnología de producción de arroz). Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), INIAP, PROTECA y PNAR, Cali, Colombia. p. 27-32.

Roy, C.; Sarkarung, S.; Zeigler, R.S. 1997. Comportamiento nutricional de algunas líneas de arroz de sabana en los suelos de las sabanas colombianas. In: Cuevas, F. (ed.). Arroz en América Latina: Mejoramiento, manejo y comercialización. Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT) e International Rice Research Institute (IRRI), Cali, Colombia. p. 274-275.

Tanaka, A.; Yoshida, S. 1970. Nutritional disorders of the rice plant in Asia. Technical Bulletin 10. International Rice Research Institute (IRRI), Los Baños, Filipinas. p. 18-19.

Winslow, M.D. 1993. Silicon: A new macronutrient deficiency in upland rice. Documento de Trabajo no. 149. Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), Cali, Colombia. 89 p.

Winslow, M.D.; Okada, K.; Correa-Victoria, F. 1997. Silicon deficiency and the adaptation of tropical rice ecotypes. Plant and Soil 188(2): 239-248.

Anexo

Guía para interpretar el análisis químico de suelos para el cultivo del arroz, en la que se sugieren tres rangos o niveles para ubicar los datos analíticos reales y tres texturas correspondientes

A. Tabla de rangos analíticos

Parámetro o nutriente	Unidad	Nivel bajo	Nivel medio	Nivel alto
pH		6.0	6.0 – 6.5	6.5
Materia orgánica	%	1.5	1.5 – 3.0	3.0
Azufre	ppm	10	10 – 20	20
Fósforo	ppm	10	10 – 20	20
Calcio	cmol/kg	1	1 – 2	2
Magnesio	cmol/kg	0.5	0.5 – 1	1
Potasio	cmol/kg	0.2	0.2 – 0.4	0.4
Cobre	ppm	1.5	1.5 – 3.0	3.0
Hierro	ppm	15	15 – 30	30
Zinc	ppm	2	2 – 4	4
Manganeso	ppm	3	3 – 7	7
Boro	ppm	0.25	0.25 – 0.50	0.50
Textura		Liviana	Intermedia	Pesada

B. Métodos de análisis

Parámetro	Método
pH	Suelo:agua, 1:1
Materia orgánica	Walkley–Black
Fósforo	Bray II
Azufre	$Ca(H_2PO_4)_2$
Bases	Acetato de amonio 1N, pH 7.0
Elementos menores	DTPA (ácido dietilén-triamino-pentaacético), agente quelatador
Boro	Agua caliente

FUENTE: Medina y Castilla (2001).

Capítulo 19

Manejo estratégico y producción competitiva del arroz con riego en América Latina

Edward L. Pulver

Contenido

	Página
Resumen	350
Abstract	350
Situación del arroz en América Latina y el Caribe	351
Seis prácticas estratégicas de manejo	352
Fecha estratégica de siembra	352
Densidad óptima de siembra	354
Control oportuno de plagas	355
Fertilización precisa y equilibrada	355
Control integral de malezas	360
Manejo estratégico del agua	361
Conclusiones	362

Resumen

Se describen seis prácticas estratégicas de manejo del cultivo de arroz para hacer más competitiva su producción en América Latina y el Caribe: 1) fecha estratégica de siembra; 2) densidad óptima de siembra; 3) control de plagas (enfermedades e insectos dañinos); 4) fertilización precisa y equilibrada; 5) control integral y oportuno de las malezas, y 6) manejo estratégico y eficiente del agua de riego. Si estas prácticas se aplican de manera integrada y precisa, producirán incrementos significativos en el rendimiento del arroz sin aumentar los costos de producción por hectárea, es decir, se mejorará la competitividad del cultivo. En general, esta estrategia está enfocada en la identificación de prácticas mejoradas de manejo del cultivo y en su transferencia a los agricultores.

Abstract

Strategic management and competitive production of irrigated rice in Latin America
Six strategic rice crop management practices, designed to increase the competitiveness of rice production in Latin America and the Caribbean, are described: (1) strategic planting date; (2) optimum planting density; (3) pest control (diseases and harmful insects); (4) balanced fertilization; (5) integrated early weed control; and (6) strategic and efficient irrigation water management. If these practices are applied in an integrated and precise manner, rice yields

will increase significantly without increasing production costs per hectare; in other words, crop competiveness will improve. In general, this strategy focuses on the identification of improved crop management practices and their transfer to farmers.

Situación del arroz en América Latina y el Caribe

América Latina y el Caribe (ALC), incluyendo México, producen de 14 a 15 millones de toneladas de arroz blanco ('molinado') al año, pero la demanda de toda la región excede la oferta en más de 1 millón de toneladas. El consumo aparente es, aproximadamente, de 30 kg per cápita para más de 500 millones de habitantes de la región mencionada.

El arroz producido en América Central y en el Caribe satisface sólo el 50% de la demanda total de esa área, donde se importan anualmente, por tanto, cerca de 1.5 millones de toneladas de arroz. El consumo per cápita es, en esa subregión, de 18 kg y se considera bajo. América del Sur, en cambio, es exportador neto de arroz porque genera un excedente de 300,000 toneladas anuales. El consumo promedio en esta subregión es mayor que 38 kg per cápita (arroz blanco), a pesar de la competencia de otros alimentos más económicos.

Entre 1987 y 2007, el área arrocera de ALC se redujo de 7.7 millones de hectáreas a menos de 6 millones, pero su producción pasó de 16 millones de toneladas (arroz 'paddy') a más de 21 millones. Se pueden mencionar dos causas de estos cambios: el liderazgo asumido por el arroz cultivado en el sistema con riego y la desaparición paulatina del arroz de secano poco favorecido, especialmente en América Central y en Brasil. No obstante, el rendimiento del arroz con riego es relativamente bajo y muy inferior al potencial de rendimiento de las variedades disponibles hoy para ese sistema.

Actualmente, el arroz con riego y los sistemas de secano muy favorecido producen cerca del 70% de todo el arroz de ALC, donde los genotipos de alto potencial ocupan más del 90% del área cultivada. Sin embargo, el rendimiento logrado por los agricultores se mantiene por debajo del rendimiento potencial de las variedades disponibles. Esta limitación afecta mucho la competitividad de la producción de arroz en la región, especialmente frente al mercado internacional (ver **Introducción** de esta obra).

¿Cuál sería la mejor estrategia para hacer más competitiva la producción de arroz en la región de ALC? En este capítulo se propone una, cuyo enfoque es el siguiente:

> Identificar y transferir a los agricultores mejores prácticas de manejo del cultivo que permitan a las variedades mejoradas disponibles expresar su alto potencial de rendimiento.

Esta estrategia implica, sin duda, un trabajo coherente y de conjunto de dos disciplinas: la investigación y la transferencia de tecnología. Se describen enseguida las prácticas estratégicas de manejo del cultivo que, aunque son conocidas, no se aplican de manera *integrada y precisa*; sólo así darán los incrementos significativos en el rendimiento del arroz que no aumentarán los costos de producción por hectárea, es decir, se mejorará la competitividad del cultivo.

Seis prácticas estratégicas de manejo

Entre el 2001 y 2007, el personal técnico del Fondo Latinoamericano para Arroz de Riego (FLAR) identificó seis prácticas de manejo del cultivo de arroz que, mejoradas en su aplicación, son esenciales para obtener un alto rendimiento. Cada práctica debe ajustarse a las condiciones del país o de la zona arrocera, pero sus buenos efectos se mantienen. Son las siguientes:

- Fecha estratégica de siembra.
- Densidad óptima de siembra.
- Control de plagas (enfermedades e insectos dañinos) más intenso en las etapas tempranas de desarrollo del cultivo.
- Fertilización equilibrada.
- Control temprano de malezas.
- Manejo eficiente del agua de riego.

Estas prácticas mejoradas, que se consideran estratégicas respecto a su objetivo, deben aplicarse todas y de manera integral. Si se aplican dos o tres y se sustituyen las otras por prácticas convencionales no mejoradas, no se obtendrá un incremento significativo en el rendimiento del cultivo. En cambio, cuando las seis prácticas mencionadas se aplican con precisión, cumplen su función estratégica, es decir, ayudan al cultivo a lograr incrementos de rendimiento de 2 a 4 t/ha, sin que aumenten los costos de producción.

Fecha estratégica de siembra

Se ha creído, erróneamente, que la mayoría de las regiones tropicales arroceras cuentan con las condiciones ambientales propicias para producir arroz, en forma continua y competitiva, durante casi todo el año. Por culpa de esta creencia, el diseño de los sistemas de riego y de distribución de agua es deficiente, las instalaciones para almacenar el grano son inadecuadas y la maquinaria agrícola es insuficiente. Además, se presta poca atención a la fecha de siembra: la mayoría de los cultivos de arroz del trópico se siembran según las tradiciones o las épocas de lluvias, y rara vez se programan partiendo de información técnica precisa.

Una situación similar se presenta en la franja arrocera de la zona templada de América del Sur respecto a la fecha de siembra.

Radiación solar

En general, un rendimiento bajo e inestable es el resultado de la falta de atención a factores ambientales críticos que afectan directamente la producción de arroz; uno de ellos es la radiación solar. El arroz es un cultivo muy sensible al nivel de radiación solar desde antes del inicio del primordio hasta después de la floración (Figura 1). Muchas variedades tropicales de 130 días de ciclo inician la panícula alrededor de los 60 días y florecen a los 90 días. Para tales variedades, la radiación solar óptima debe coincidir con el período que va de los 50 a los 100 días después de la emergencia de las plántulas; si no se aprovecha con precisión ese período crítico, pueden ocurrir los siguientes efectos:

- El rendimiento del cultivo registra un impacto negativo cuando la luz solar incidente durante el período vegetativo y en la etapa de llenado del grano es baja.
- Las panículas pequeñas son, casi siempre, el resultado de un bajo nivel de radiación solar durante el inicio de la panícula.
- La alta esterilidad del grano se debe a una baja radiación solar durante las últimas etapas del período reproductivo.

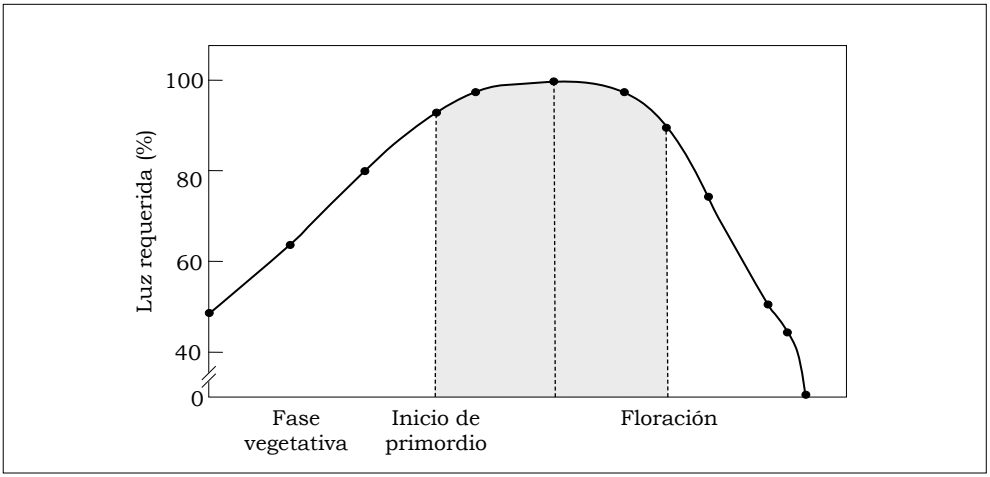


Figura 1. Fase crítica del cultivo de arroz en relación con la radiación solar.

El nivel de radiación solar adecuado para obtener un rendimiento de arroz de 8 a 10 t/ha debe ser mayor que 450 cal/cm^2 por día. El rendimiento disminuye mucho si ese nivel es inferior a 400 cal/cm^2 por día. Un ambiente propicio para los altos rendimientos, como California, la zona costera de Perú, Australia y el Cono Sur de América del Sur, tiene un nivel de radiación solar superior a 500 cal/cm^2 por día (puede llegar a más que 600). Esta condición ambiental permite obtener 12 t/ha de arroz o más. Una radiación solar menor que 350 cal/cm^2 por día es común durante la época de cultivo en los sistemas de secano 'favorecido', en las zonas lluviosas de Colombia, Panamá y el sur de Costa Rica; aunque se apliquen diferentes prácticas de manejo, el rendimiento del arroz en esas zonas estará siempre limitado por la escasa radiación solar. El rendimiento de 4 t/ha o menos que se obtiene allí comúnmente representa sólo el 30% del potencial de rendimiento de las variedades sembradas.

Falta información histórica sobre este parámetro y son escasos los ensayos sobre fechas de siembra en los países de ALC; sin estos recursos, los agricultores no pueden programar la siembra del arroz según las condiciones más favorables para el cultivo durante su período crítico de crecimiento. En la mayoría de los países tropicales, los agricultores se fían de equipos meteorológicos que simplemente registran el número de horas de brillo solar por día. Estos datos son limitados porque la variación mensual de la cantidad de calorías/hora de brillo solar es grande. Hay información de los siguientes países:

- En Colombia, sólo el CIAT tiene datos de 20 años de radiación solar de cinco sitios. Sin embargo, sólo en los Llanos Orientales esos datos corresponden a áreas productoras de arroz. La información sobre Palmira y Santander de Quilichao (donde el CIAT tiene estaciones) podría usarse para calcular el nivel de radiación solar del área agrícola de Jamundí, pero en este municipio (situado entre los dos anteriores) la producción de arroz es secundaria. La información de los cinco sitios manejados por el CIAT se podría usar para tener una

idea aproximada de la radiación solar de toda Colombia, cuyas estaciones registran solamente el brillo solar.
- En Venezuela hay numerosas bases de datos sobre radiación solar de las principales áreas de producción de arroz del país, pero no las utilizan.
- En Costa Rica, una de las fincas comerciales arroceras tiene datos de radiación solar de más de 10 años, pero no han sido usados para planear fechas de siembra.
- En Nicaragua hay información sobre horas de brillo solar solamente.
- En el Cono Sur (Brasil y Uruguay) hay una amplia base de datos de radiación solar.

Muy pocos países de ALC reconocen la importancia de la radiación solar y carecen, además, de datos históricos de ensayos de campo sobre este factor climático; por consiguiente, la información que tienen sobre fechas de siembra del arroz es imprecisa. En los últimos 6 años, el personal técnico del FLAR ha reunido la información sobre radiación solar disponible en varios países y muchos datos históricos de rendimientos de cosechas en fincas comerciales. La combinación de estos datos ha permitido establecer fechas de siembra precisas para aquellos países que podían proporcionar los datos más completos. En los países en que los datos sobre la radiación solar se extrapolaron de los datos registrados de horas de brillo solar, las fechas de siembra fueron menos precisas. Aunque se emplearon en este trabajo diversos métodos para obtener datos faltantes de radiación solar, el rendimiento de arroz obtenido en ensayos en que se emplearon las fechas de siembra recomendadas por el FLAR validaron la recomendación.

Densidad óptima de siembra

Los agricultores de casi todos los países de ALC están acostumbrados a sembrar una cantidad grande de semilla, para prevenir 'posibles' pérdidas (por calidad de la semilla, por depredadores, por condiciones imprevistas de suelo y clima) y para lograr el máximo cubrimiento del terreno; por ejemplo: de 200 a 300 kg/ha en Colombia, de 180 a 220 kg/ha en Venezuela y en el sur de Brasil, 150 kg/ha en Costa Rica y 180 kg/ha en Nicaragua. No hay ningún fundamento técnico que justifique esas densidades de siembra. Una alta densidad de siembra trae consigo muchos efectos negativos; por ejemplo, las plantas crecen débiles y no responden a los fertilizantes, y la incidencia de las enfermedades aumenta.

Se ha demostrado, en numerosos estudios, que una población de 150 a 250 plantas/m^2 es la adecuada para obtener un rendimiento alto. Este número de plantas puede obtenerse con una densidad de ***80 a 100 kg/ha de semilla*** en todas las modalidades de siembra, es decir, con semilla pregerminada o con semilla seca. Si se siembra en hileras, esa densidad puede llegar hasta 40 ó 50 semillas/m, que equivalen a un rango de 60 a 75 kg/ha, dejando 17 cm de espacio entre los surcos.

Plantas sanas

El número óptimo de plantas hace que los tallos sean gruesos y menos susceptibles al ataque de insectos y a las enfermedades. Ahora bien, las plantas sanas responden mejor a los fertilizantes y arrojan, por ello, un mayor rendimiento.

En varios países de ALC se ha comprobado que es muy difícil obtener un rendimiento alto si la población de plantas es grande. La práctica recurrente de sembrar grandes poblaciones de arroz en casi toda la región de ALC da como resultado plantas débiles que se enferman fácilmente y son incapaces de responder al manejo mejorado con fertilizantes o a las condiciones climáticas favorables.

Control oportuno de plagas

Durante las etapas iniciales del establecimiento del cultivo, las plantas jóvenes están expuestas a varios insectos plaga, entre ellos sogata (*Tagosodes oryzicolus*), la mosca hidrelia (*Hydrellia* sp.) y el gorgojo (*Lissorhoptrus* sp.); en Venezuela se encuentra, además, la chinche 'chapulín' (*Trigonotylus* spp.). Los semilleros jóvenes son muy sensibles al ataque de estos insectos, y las plántulas no pueden recuperarse de un daño recibido en época temprana y, a menudo, mueren. En ALC se hacen comúnmente aplicaciones profilácticas de insecticidas, en particular de piretroides, que se aplican mezclados con herbicidas. Ahora bien, la aplicación temprana de insecticidas no selectivos de amplio espectro crea un ambiente propenso a la aparición de nuevas plagas, porque destruye insectos y arañas benéficos para el cultivo.

Semilla tratada

Se propone, como una alternativa estratégica a los insecticidas foliares no selectivos, tratar las semillas con insecticidas. Este tratamiento tiene tres ventajas importantes:

- Hace un control temprano de casi todos los insectos dañinos del arroz y actúa, además, de manera selectiva: no destruye los insectos benéficos porque se elige un insecticida que ataque sólo los insectos que se alimentan del arroz.
- No lesiona el ambiente, antes bien evita que el insecticida se esparza a sitios a donde no debe dirigirse ('spray drift').
- Emplea menos producto insecticida que una aspersión convencional.

La actual preocupación por el medio ambiente restringe el uso de insecticidas que se aplican a las hojas y cuyos residuos contaminan el agua. Han aparecido, por tanto, nuevos productos en el mercado. Actualmente, hay dos muy populares para los cultivadores de arroz: en uno de ellos el ingrediente activo es el imidacloprid y en el otro el fipronil. Hay una gran diversidad de insecticidas comerciales que contienen estos ingredientes activos, y todos son efectivos en el tratamiento de las semillas. El costo de tratar las semillas de arroz con estos productos oscila, normalmente, entre U$15 y U$25 por hectárea. Los productos que ofrece el mercado como alternativa para manejar las plagas mencionadas son, generalmente, más costosos y requieren, a veces, muchas aplicaciones.

En Río Grande do Sul, en Brasil, la relación costo/beneficio del tratamiento de las semillas de arroz está entre 1:5 y 1:8, y en Venezuela está cerca de 1:5. En conclusión, el tratamiento de las semillas es una práctica efectiva y eficiente para el manejo de los principales insectos plaga del arroz y, además, beneficia el ambiente. Si se combinan las dos prácticas anteriores (semilla tratada y densidad de siembra apropiada), el control de los insectos plaga se hace mucho más económico.

Fertilización precisa y equilibrada

Sólo cuando un cultivo dispone de los nutrientes adecuados puede dar un rendimiento alto. Por otro lado, si el genotipo de arroz tiene un alto potencial de rendimiento, su demanda de nutrientes será más alta. Aunque estas afirmaciones son obvias, muchos agricultores no ajustan la cantidad de abono que aplican teniendo en cuenta tres factores:

- El potencial de rendimiento del cultivo.
- Las condiciones de crecimiento del cultivo.
- El nivel de fertilidad del suelo.

En la mayoría de los países de ALC se dispone solamente de recomendaciones o 'recetas' de fertilizantes, que no se ajustan con precisión al tipo de suelo en que se hace la aplicación, a la trayectoria del uso de ese suelo o a ciertas condiciones ambientales (por ejemplo, un alto nivel de radiación solar). Esas recetas conducen a un desequilibrio de nutrientes, a la aplicación de nutrientes inadecuados o a una aplicación excesiva de algún fertilizante.

Se presentan enseguida algunas *pautas generales* para la fertilización del arroz cultivado en el sistema con riego; una recomendación más precisa debe considerar las *condiciones locales*. Los nutrientes más importantes para la producción de arroz en ALC son fósforo, potasio, azufre, zinc y nitrógeno; los tres primeros son necesarios en todas las zonas de producción y los dos últimos sólo en sitios específicos.

Fósforo

Un genotipo de arroz de alto rendimiento absorbe del suelo, aproximadamente, de 40 a 60 kg/ha de fósforo (P) durante la fase de crecimiento; el 50% de ese elemento vuelve al suelo en los residuos de la cosecha. La aplicación de un fertilizante fosforado al suelo debe enfrentar un problema: el análisis convencional de suelos es incapaz de predecir la disponibilidad de P en el suelo. En efecto, una vez el cultivo está bajo inundación permanente, el suelo libera P, cuyo nivel entonces aumenta y no correspondería al nivel bajo de ese nutriente que arrojó el análisis de la muestra de suelo tomada inicialmente.

La mejor forma, y quizás la única, de calcular la cantidad de P que necesita un cultivo es el *ensayo de campo*. Ahora bien, se hicieron análisis de suelo en varios ensayos de fertilización del arroz con riego, y los resultados indicaron que en pocos arrozales hubo una respuesta a la fertilización con P. Por consiguiente, hay que enfocarse en la siguiente estrategia: impedir que la cantidad de P del suelo llegue a un *nivel crítico* por causa de la extracción de nutrientes que hace el cultivo.

Recomendaciones. Se ha comprobado que las prácticas de fertilización fosforada que se basan en la absorción del nutriente por la planta y en la historia del cultivo son adecuadas. En un sistema de producción continua de arroz, está bien aplicar de 40 a 60 kg/ha de P_2O_5, para obtener un rendimiento alto. Esta tasa debe reducirse de 30% a 40% si el medio ambiente ofrece un nivel bajo de radiación solar. El fertilizante fosforado debe aplicarse en presiembra e incorporarse al suelo, para aumentar su eficiencia. Donde el arroz se haya sembrado durante muchos años en rotación con pastos o con soya, el P aplicado deja un residuo en el suelo, que debe tenerse en cuenta cuando se fertilice el próximo cultivo de arroz.

La fertilización con P del arroz cultivado en el *sistema de secano* puede convertirse en una práctica muy difícil de manejar si no se logra mantener una *humedad permanente* del terreno en los períodos de precipitación, ya que, de ese modo, el suelo libera el P. En los suelos en que suele sembrarse el arroz de secano, gran parte del P ha sido fijado por las arcillas, es decir, no está disponible para las plantas, que no pueden absorberlo.

Por otra parte, en muchos suelos ácidos (ya sea para siembras con riego o de secano) en que haya un *exceso de hierro*, éste inhibe la absorción del P por las plantas, dando como resultado la 'toxicidad indirecta del hierro', que es, en realidad, una deficiencia de P, principalmente ¿Cómo se maneja esta

situación? Primero se añade cal al suelo para elevar su pH y reducir así la toxicidad debida al hierro; luego se fertiliza el suelo con un fertilizante fosforado; finalmente, se siembran variedades de arroz tolerantes de esas condiciones del suelo.

Potasio

A diferencia del P, el potasio (K) es absorbido por el arroz en grandes cantidades. Si se desea obtener un rendimiento alto de arroz, el cultivo debe recibir, aproximadamente, de 200 a 300 kg/ha de K en forma de K_2O. De esta cantidad, sólo el 15% se retira del campo con el grano cosechado; el resto vuelve al suelo en los residuos del cultivo.

Cálculos. Es fácil calcular el requerimiento de K de un cultivo, porque el análisis de suelo proporciona un dato exacto de la cantidad de K que hay en el suelo. Para que el cálculo del K del suelo sea más exacto, la muestra de suelo debe tomarse después de que los residuos de cosecha se hayan descompuesto suficientemente para que liberen el K conservado del cultivo anterior.

En los *análisis de suelo*, 1 ppm de K_2O equivale, aproximadamente, a 2 kg/ha de K_2O. Por ejemplo, si en el análisis se lee un dato de 60 ppm de K, hay aproximadamente 120 kg/ha de K_2O disponibles en el suelo para que el cultivo de arroz los absorba. Si suponemos que las plantas de este cultivo requieren cerca de 200 kg/ha de K_2O, entonces a esta cifra se le resta la cantidad de K disponible en el suelo (120 kg/ha), y la diferencia (80 kg/ha) se debe aplicar como fertilizante en forma de K_2O. Este cálculo sencillo ha permitido hacer una aplicación exacta de K_2O en una gran variedad de suelos de ALC. Aunque el cultivo no responda, normalmente, a una concentración igual o menor que 100 ppm de K_2O en el suelo, es necesario agregar las cantidades pequeñas de ese abono que se requieran para evitar un posible déficit del nutriente en el suelo.

Aplicaciones. La fertilización con K es una de las prácticas de manejo menos entendidas en gran parte de ALC. En muchos países de la región se hacen aplicaciones separadas del fertilizante de K, casi siempre al tiempo con la urea y generalmente al final del ciclo de crecimiento, porque los cultivadores tienen dos creencias erróneas:

- Una, la aplicación tardía de K reduce la incidencia de las enfermedades, porque la deficiencia de K está relacionada con un aumento de la susceptibilidad a varias enfermedades. Ahora bien, si las condiciones ambientales favorecen el desarrollo de la enfermedad y la variedad de arroz es susceptible a ella, la fertilización tardía con K ofrece muy poca protección, y tal vez ninguna.
- Otra, que la aplicación tardía del fertilizante de K es efectiva. En realidad, esa efectividad es baja porque, como muchos nutrientes, no estaría disponible en el punto máximo de demanda de las plantas. El fertilizante de K es muy efectivo si se aplica todo de una sola vez antes de la siembra.

Azufre

Se ha informado sobre una deficiencia de azufre (S) en varios países de ALC. Está asociada, generalmente, con ambientes como los siguientes:

- Un suelo arenoso de pH ácido, en el que se haya sembrado arroz continuamente durante años.

- Un arrozal en que la fuente de agua para el riego sea un río o una masa superficial de agua.
- Un área para siembra donde la nivelación excesiva del terreno haya removido la primera capa de suelo (caso muy frecuente, sobre todo en Venezuela y el sur de Brasil).

El agua de riego que provenga de una fuente subterránea tiene, normalmente, suficiente S para suplir el que necesite el cultivo. Además, si el arrozal está cerca de una zona industrial, hay suficiente S disponible en el aire para satisfacer la necesidad que tienen de él las plantas de arroz.

Cálculos. Un cultivo de arroz de alto rendimiento puede acumular en la biomasa, aproximadamente, 30 kg/ha de S. Cerca del 30% de esa cantidad, o sea, 10 kg/ha, pueden ser extraídas del suelo y van al grano cosechado. En consecuencia, donde se hagan siembras continuas de arroz y no se suministre S al cultivo en el agua de riego o por la contaminación del aire, se presenta una deficiencia de S, ya que la extracción que hace la planta por las raíces supera la reserva del nutriente en el suelo.

El nivel crítico de S en el suelo está entre 10 y 12 ppm. La deficiencia de S se puede reparar fácilmente, ya que muchos fertilizantes contienen la fórmula adecuada de S para satisfacer las necesidades del cultivo de arroz. La forma más económica es, generalmente, adicionar sulfato de amonio $(NH_4)_2SO_4$ (tiene 24% de S) a la urea que se aplique antes de la inundación del terreno; basta con una cantidad de 100 a 150 kg/ha del sulfato, incluso cuando la deficiencia es severa.

Zinc

La deficiencia de zinc (Zn) se asocia, muchas veces, con los suelos cuyo pH es mayor que 5.8, y con la deficiencia severa de este elemento observada en los suelos alcalinos. Un encalamiento excesivo también induce una deficiencia de Zn. Esta *deficiencia* es común en el área de Palmira, Colombia (sede del CIAT), y en las principales áreas de producción de arroz de Nicaragua. Se ha informado de un nivel crítico de 3 ppm de este nutriente en el suelo; sin embargo, varios de esos estudios han fallado porque no hay buena respuesta del cultivo (medida en rendimiento) a una enmienda de Zn cuando el nivel del elemento en el suelo es inferior a 1 ppm, en especial en los suelos de pH ácido.

El análisis foliar es muy exacto en la detección de una deficiencia de Zn: cuando indica una concentración menor que 15 ppm en el tejido foliar, se acepta que la planta es deficiente en Zn. Es difícil distinguir un síntoma de deficiencia de Zn de uno de deficiencia de P o de pérdida de otros minerales. Los síntomas de la deficiencia de Zn aparecen inmediatamente después de establecer la inundación permanente.

Una vez detectada la deficiencia de Zn, es posible corregirla rápidamente porque hay muchas formas de aplicar este elemento, por ejemplo:

- Aplicación foliar de quelatos de Zn (la más común).
- Aplicación de fertilizantes de reacción básica fortificados con Zn.
- Tratamiento de la semilla con un producto que contenga Zn (cuando se sabe previamente que el suelo es deficiente en este elemento).

Nitrógeno

El nitrógeno (N) es el elemento más difícil de manejar en un cultivo de arroz con riego, por dos razones: las plantas necesitan cantidades relativamente grandes de N para dar un rendimiento alto, y un mal manejo de este nutriente tiende a causar pérdidas considerables

del N aplicado. Un cultivo de arroz puede dar un rendimiento alto si ha absorbido del suelo y acumulado en su biomasa más de 250 kg/ha de N, y casi toda esa cantidad antes de la floración. La absorción de N durante la fase crítica de crecimiento es, por tanto, rápida y se pueden inducir deficiencias fácilmente si se aplica una cantidad inadecuada de N o se aplica el N en condiciones ambientales adversas que ocasionen pérdidas grandes del elemento (ver más adelante). Ahora bien, una vez ocurrida la deficiencia en la fase vegetativa del cultivo, es difícil recuperar el rendimiento que se hubiera obtenido haciendo aplicaciones de N durante la etapa de iniciación de la panícula.

Urea. La urea es uno de los fertilizantes de N que más se usan en la producción de arroz. Una enzima del suelo, la ureasa, convierte rápidamente la urea, $CO(NH_2)_2$, en carbonato de amonio, $(NH_4)_2CO_3$. Antes de ser absorbido por las raíces del arroz, este compuesto puede perder el N de dos maneras:

- El amoníaco (NH_3), que es un gas, se escapa rápidamente del carbonato de amonio, especialmente en el agua de riego del arrozal. Si la urea se aplica al agua de inundación, la pérdida de N como NH_3 representa, a menudo, entre el 50% y el 70% del N aplicado.
- Cuando el ión amonio (NH_4^+) se convierte en un nitrato (NO_3^-) mediante un proceso de nitrificación y si el cultivo es anegado luego, hay pérdidas de N debidas a la desnitrificación.

Para obtener un rendimiento alto de un cultivo de arroz, las *pérdidas de N* por volatilización y por desnitrificación deben ser evitadas o reducidas a un porcentaje mínimo. El buen manejo agronómico permite lograr una eficiencia de 25 a 30 kg de grano por kg de N aplicado; en cambio, un manejo inadecuado termina comúnmente en una eficiencia de 10 a 15 kg de grano por kg de N aplicado.

La práctica estratégica aquí recomendada para lograr una alta eficiencia del N aplicado incluye los puntos siguientes:

- Evitar la aplicación de urea al agua, al barro o al suelo húmedo durante las etapas tempranas de desarrollo de las plantas, porque así se pierde el N por volatilización.
- Aplicar siempre la urea sobre suelo seco durante las etapas tempranas de desarrollo del cultivo; inmediatamente después de la aplicación, inundar el campo para que el N se filtre dentro del suelo. El máximo intervalo de tiempo entre la aplicación de urea y la inundación del terreno es de 5 días, y esa inundación debe mantenerse hasta la maduración del cultivo: así se evita la nitrificación del N.

En casi todos los países de ALC se hacen, comúnmente, aplicaciones separadas de urea (en varias épocas del cultivo). Sin embargo, si las condiciones del clima y del suelo son apropiadas, una sola aplicación del fertilizante nitrogenado tiene la misma efectividad que las aplicaciones separadas. El arroz limita su propia habilidad para responder al N cuando éste se aplica durante la etapa de *iniciación de la panícula*; por consiguiente, la cantidad máxima que convendría aplicar en ella está, normalmente, entre 25 y 35 kg/ha de N. Además, el fertilizante nitrogenado (urea o un nitrato) que se emplee en esta etapa puede aplicarse al agua de riego, porque ahora el cultivo tiene un sistema de raíces bien establecido que absorberá rápidamente el N en el compuesto aplicado.

Cantidades. La cantidad de fertilizante nitrogenado que se requiere para obtener un rendimiento alto de un cultivo de arroz varía bastante, porque depende de

las condiciones climáticas, de las propiedades del suelo en que se hará la siembra y de la historia del cultivo en la localidad. Se consideran los siguientes casos:

- En los sistemas de producción continua de arroz, en el trópico, la mayoría de los suelos disponen del N suficiente para que el cultivo rinda de 3 a 4 t/ha.
- Si las condiciones climáticas, especialmente la radiación solar, son adecuadas y permiten obtener 8 t/ha, es necesario que el suelo tenga suficiente N para que el cultivo rinda de 4 a 5 t/ha adicionales; suponiendo una eficiencia del N de 30 kg de grano por kg de N aplicado, hay que agregar al suelo de 130 a 170 kg/ha de N para obtener de 4 a 5 t/ha más.
- Donde el arroz ha sido rotado con pastos durante muchos años, el N del suelo es, a menudo, suficiente para que el arroz rinda de 6 a 7 t/ha; ahora bien, si las condiciones climáticas son adecuadas (ver caso anterior), para poder obtener 8 t/ha hay que aplicar fertilizante nitrogenado que aporte sólo de 30 a 70 kg/ha de N para producir 1 ó 2 t/ha adicionales (y completar las 8 t/ha finales). Este cálculo supone también una eficiencia de 30 kg de grano por kg de N aplicado.

En resumen, la cantidad de fertilizante nitrogenado que necesita un cultivo se basa en el potencial de rendimiento del cultivo, el cual depende, a su vez, de la radiación solar disponible y del contenido natural de N del suelo.

Aplicaciones. ¿Hay que hacer una o varias aplicaciones de N durante el ciclo de cultivo? Esta decisión depende del agua disponible, de la topografía del terreno y de algunas limitantes de carácter local, como la espiga erecta.

- Si el cultivo está expuesto a fluctuaciones en el riego que generan, alternativamente, condiciones aeróbicas y anaeróbicas en el suelo, es preferible hacer aplicaciones separadas de N, porque buena parte de éste se perdería cuando ocurran la nitrificación y la desnitrificación antes descritas.
- Si hay que drenar el arrozal durante la época de cosecha para evitar el fenómeno de la espiga erecta, es preferible hacer aplicaciones separadas.
- Si la variedad es de ciclo largo, es decir, mayor que 150 días, responde muchas veces a aplicaciones menores de N al inicio de la panícula.

Ahora bien, en ausencia de estas condiciones especiales, *una sola aplicación* de N en suelo seco antes de la inundación del terreno es más efectiva que las aplicaciones separadas del nutriente.

Control integral de malezas

El control de las malezas del arrozal es esencial para obtener un rendimiento alto de arroz. El control adecuado, o sea, el que da resultados efectivos y es eficiente, es una práctica estratégica que requiere el concurso de otras cuatro prácticas: la adecuada preparación del suelo, el empleo de semilla limpia (de alta calidad), la fertilización apropiada y el buen manejo del agua. El control químico de las malezas es sólo uno de los componentes de un programa integral de manejo de malezas.

Herbicidas. Hay muchas prácticas de cultivo que reducen la incidencia de las malezas y dan a las plantas una ventaja competitiva durante sus etapas tempranas de desarrollo; lamentablemente, esas prácticas han sido reemplazadas por un control basado

en recetas que depende exclusivamente de la aplicación de determinados herbicidas, por lo demás costosos. Durante los últimos años han llegado al mercado nuevos productos agroquímicos diseñados para controlar muchas especies de malezas en etapas posteriores de desarrollo (de la maleza y del cultivo). La promoción que reciben ha extendido su uso, lo que ha modificado mucho el control de malezas del arroz en casi toda la región de ALC. La situación actual es una dependencia exagerada de la aplicación tardía de varios productos específicos, que ha incrementado el costo del control de malezas del arroz.

Las malezas compiten con el arroz durante las etapas tempranas del desarrollo del cultivo, y esta competencia reduce el rendimiento del arroz. Cuando se hacen múltiples aplicaciones de herbicidas cuya forma de acción es limitada, el resultado es un incremento de la resistencia de las malezas a esos productos. En algunos países (Colombia, por ejemplo), el costo del control de malezas está entre U$300 y U$400 por hectárea, y todavía es deficiente.

Propuesta. La estrategia que aquí se propone consta de varias prácticas:

- Donde se cultiva arroz con riego en dos temporadas cada año, las técnicas de *preparación del suelo* son decisivas para reducir luego la incidencia de las malezas. En algunos países se emplea el 'fangueo' y en otros la 'quema' con productos químicos antes de la siembra. En las áreas arroceras de la zona templada es común el 'cultivo mínimo' (o labranza mínima, sin laboreo del suelo), en el cual la '*quema química*' permite reducir considerablemente las malezas. El objetivo de esta práctica es restringir la competencia temprana de las malezas.
- Una vez establecido el cultivo, tiene una ventaja competitiva frente a las malezas. Si en este momento se hace una aplicación (que aún es temprana) de una *mezcla de productos* químicos preemergentes y posemergentes, y enseguida se establece la *inundación* permanente del terreno, se obtiene un excelente control de malezas a un costo razonable. Hay muchos productos relativamente económicos que sirven bien a esta práctica; por su parte, la resistencia de las malezas sería aquí un problema menor, porque los productos químicos de la mezcla, que tienen distintas formas de acción, pueden rotarse entre temporadas.
- La aplicación *temprana* de los productos posemergente de la mezcla es la clave del éxito de esta práctica, es decir, la mezcla debe aplicarse cuando las malezas tengan *de 1 a 3 hojas*.
- El control residual de malezas se logra estableciendo la *inundación permanente*, tan pronto como el cultivo lo permita.

Esta estrategia, que es un programa integral de manejo de malezas, ha demostrado ser más efectiva y eficiente que el mero control químico, del cual dependen hoy muchos cultivadores.

Manejo estratégico del agua

El riego es el plaguicida más efectivo y el fertilizante más eficiente que hay en el mercado. El buen manejo del riego es esencial, además, para que el control de las malezas sea eficaz, y la fertilización, especialmente la de N, sea muy eficiente. La práctica aquí propuesta es establecer una *inundación temprana* inmediatamente después de la aplicación de la urea; además de los efectos mencionados, esta práctica contribuye a la liberación de muchos nutrientes del suelo, especialmente el P. Si se retarda

el establecimiento de la inundación permanente, el rendimiento de grano se deprime y los costos de producción aumentan.

No hay una regla fija sobre el *mejor tiempo* para establecer la inundación permanente en un cultivo de arroz. Ese momento varía según la nivelación del terreno, la presencia de algas en el agua de riego y otros factores. La guía general es la siguiente: hacerlo tan pronto como el desarrollo del cultivo lo permita. La inundación permanente debe mantenerse hasta después de la floración, etapa en que ya no es necesario hacer más riegos.

Conclusiones

Toda intervención tecnológica mejorada se basa en el '***manejo con precisión***', el cual, tratándose de insumos, requiere que la aplicación de éstos se haga en la cantidad exacta, en el momento preciso y bajo condiciones (ambientales y del cultivo) que favorezcan una alta eficiencia en el resultado. Los objetivos del manejo con precisión del cultivo de arroz son la obtención de altos rendimientos y la mayor eficiencia en esa producción de grano.

La intervención tecnológica aquí propuesta, que consiste en seis prácticas estratégicas que deben aplicarse al cultivo de manera integrada, dará resultados significativos; si se escogen dos o tres de dichas prácticas y se omiten las demás, los resultados no serán los esperados. Si las seis prácticas estratégicas se aplican con precisión, se logra un aumento del rendimiento del arroz sin necesidad de incrementar los costos de producción por hectárea.

El manejo con precisión de las seis prácticas estratégicas no sólo da beneficios económicos al cultivador de arroz sino que causa un impacto ambiental considerable y positivo, que se manifiesta en los siguientes efectos:

- Se reduce el uso de *pesticidas*, porque la semilla tratada que se emplee permite disminuir notablemente y, a menudo, eliminar las repetidas aplicaciones foliares de insecticidas.
- Se reduce el uso de *herbicidas*, porque la práctica propuesta para el control de malezas es más eficiente y efectiva que la simple aplicación de estos productos.
- Se reduce mucho la emisión de dos *gases de invernadero* en los arrozales: el amoníaco (NH_3) y el óxido nitroso (N_2O), gracias al manejo mejorado del agua y a la aplicación de la urea en suelo seco.
  - En el sistema de arroz con riego, el uso ineficiente de la urea es la causa principal de la emisión de amoníaco desde la lámina de agua; no debe aplicarse la urea al agua o al barro porque gran parte del N que contiene se volatilizará como amoníaco.
  - Cuando en el arroz con riego se aplica urea, se deja secar el suelo y luego se inunda el terreno, hay emisión de óxido nitroso.

PARTE D

Conocimiento de las Arvenses del Cultivo y su Manejo

BLANCA 364

Capítulo 20

Malezas de los arrozales de América Latina

Cilia L. Fuentes
Armando Osorio
Juan Carlos Granados
Wilson Piedrahíta

Contenido

	Página
Resumen	365
Abstract	365
Introducción	366
Descripción botánica de las especies de malezas del arroz	367
Distribución geográfica	381
Referencias bibliográficas	384
Glosario	387

Resumen

Se presentan la descripción botánica y la distribución geográfica de las 25 especies principales de malezas de los arrozales de América Latina. En un campo de arroz típico, la flora de malezas está constituida por cerca de 30 especies, que se han distribuido en cuatro grupos: dominantes, porque su densidad en el terreno es alta; secundarias, porque su densidad es intermedia; poco frecuentes, y raras. En la franja arrocera de América Latina y el Caribe, 25 especies de malezas (pertenecientes a 12 familias botánicas) son las especies más frecuentes. Se sugiere que la clave para emprender cualquier acción respecto a estas plantas es identificar las especies consideradas como malezas o arvenses y conocerlas bien. Los fabricantes de herbicidas, por ejemplo, deben reconocer correctamente las especies que son controladas por las sustancias que ellos producen.

Abstract

Weeds affecting rice fields in Latin America

A botanical description is given of the 25 most important weed species affecting rice fields in Latin America, as well as their geographical distribution. A typical rice field can present up to 30 species of weeds, distributed in four groups: dominant (high density); secondary (intermediate density); infrequent; and rare. In the rice belt of Latin America and the Caribbean, 25 weed species (belonging to 12 botanical families) have been identified as the most frequent. The key to undertaking any weed control action in rice is to identify and study those species considered as weeds. Herbicide manufacturers, for example, should correctly recognize the species being controlled by their products.

Introducción

El concepto de 'maleza' o mala hierba es antropocéntrico, es decir, el hombre hizo que algunas especies vegetales fueran malezas en el momento mismo en que dio inicio a la agricultura. La maleza, como entidad y concepto agronómicos, ha sido definida de muchas maneras, y casi todas estas definiciones están basadas en la relación entre el ser humano y el cultivo racional de las plantas (Sen, 1981). En la lengua española se usa, como sinónimo de maleza, el término 'arvense', que designa, según el Diccionario de la Real Academia de España, las plantas que crecen en los sembrados (http://drae2.es/arvense).

Identificar las especies consideradas como malezas y conocerlas bien es la clave para emprender cualquier acción respecto a ellas, por ejemplo la investigación básica o la aplicada, o la planeación y ejecución de un programa para manejarlas. Si se consideran entonces las malezas como un problema agrícola, el primer paso para solucionarlo será siempre su correcta determinación. Por ejemplo, *Cyperus luzulae* y *Scleria pterota* son ciperáceas conocidas vulgarmente como 'cortaderas' y catalogadas como plantas de 'hoja angosta'; pues bien, el Diurón (fórmula comercial de un herbicida constituido por la mezcla de los compuestos activos atrazina + diurón, este último proveniente de la urea) controla la última especie pero no la primera, porque fue recomendado para un nombre vulgar (cortadera) y no para una especie correctamente definida. Es importante, por tanto, que la etiqueta de los envases de herbicidas mencione las especies que éstos controlan por su respectivo nombre científico (Doll et al., 1989).

Otro caso interesante de desconocimiento de la identidad de las especies de malezas es el de las especies de los géneros *Digitaria* y *Leptochloa*. Las primeras se conocen como 'guarda rocío', y hay al menos cuatro de ellas asociadas con los campos de arroz de América Latina: *D. bicornis, D. horizontales, D. ciliaris* y *D. sanguinalis*. Hay, igualmente, cuatro especies del género *Leptochloa* conocidas como 'pajas': *L. virgata*, *L. scabra*, *L. mucronata* y *L. uninervia*. Ahora bien, las etiquetas de los herbicidas no identifican, generalmente, por su nombre científico, la especie que dicen controlar cuando se refieren a la maleza 'guarda rocío' o a las llamadas 'pajas'. Por tal razón, se han observado en el campo diferencias en la respuesta de las especies de *Digitaria* y de *Leptochloa* a algunos herbicidas (Alvarez, 2004).

En un campo de arroz típico, la flora de malezas está constituida por cerca de una treintena de especies, que se pueden distribuir en cuatro grupos:

- Cinco de ellas llegan a ser ***dominantes*** porque su densidad es alta en el terreno.
- La mayoría de ellas tienen un valor intermedio, en términos de abundancia, y se denominan ***secundarias***.
- Unas pocas son las llamadas malezas ***poco frecuentes***.
- Hay, finalmente, unas pocas especies denominadas por algunos autores ***especies raras***, que ocupan el cuarto grupo.

En trabajos recientes de reconocimiento de la flora de malezas asociada con los arrozales de la zona del Tolima, en Colombia, se registraron más de 100 especies pertenecientes a 36 familias botánicas. Cerca del 31% pertenecían a sólo dos familias, las gramíneas (22%) y las compuestas (9%); un 28% estaban en las ocho familias siguientes: fabáceas (*sensu stricto*), euforbiáceas, ciperáceas, rubiáceas, solanáceas y amarantáceas;

las especies restantes (un 40%) se agrupaban en otras 26 familias (Puentes y Fuentes, 2003; Fuentes et al., 2006).

El siguiente listado contiene 25 de las principales especies de malezas asociadas con los campos de arroz de América Latina:

Familia y especies

Amaranthaceae
1. *Amaranthus dubius* Mart. ex Thell.

Asteraceae (Compositae)
2. *Eclipta alba* (L.) Hassk.

Caesalpinaceae
3. *Senna obtusifolia* (L.) H.S. Irwin & Barneby

Commelinaceae
4. *Commelina erecta* L.
5. *Murdannia nudiflora* (L.) Brenan

Cyperaceae
6. *Cyperus esculentus* L.
7. *Cyperus iria* L.
8. *Cyperus rotundus* L.
9. *Fimbristylis miliacea* (L.) Vahl

Euphorbiaceae
10. *Caperonia palustris* (L.) A. St. Hil.

Fabaceae
11. *Macroptilium lathyroides* (L.) Urban

Limnocharitaceae
12. *Limnocharis flava* (L.) Buchenau

Onagraceae
13. *Ludwigia decurrens* Walter
14. *Ludwigia erecta* (L.) H. Hara

Poaceae
15. *Digitaria bicornis* (Lam.) Roemer et Schultes
16. *Echinochloa colona* (L.) Link
17. *Eleusine indica* (L.) Gaertn.
18. *Ischaemum rugosum* Salisb.
19. *Leptochloa mucronata* (Michaux) Kunth
20. *Oryza sativa* L.
21. *Rottboellia cochinchinensis* (Lour.) W. Clayton

Pontederiaceae
22. *Heteranthera limosa* (Sw.) Willd.

Portulacaceae
23. *Portulaca oleracea* L.

Rubiaceae
24. *Richardia scabra* L.

Solanaceae
25. *Physalis angulata* L.

Descripción botánica de las especies de malezas del arroz

Se presenta enseguida una descripción morfológica detallada de cada una de las especies antes mencionadas.
[NV = nombre vulgar, sin. = sinónimo(s)].

Amaranthaceae

1. ***Amaranthus dubius*** Martius
   sin. *Amaranthus tristis* Willd.

   NV: bledo, bledo blanco, bleo, bledo rojizo, quelite

Hierba erecta, hasta de 1 m de alta; monoica. **Tallos** carnosos, rojizos en fresco, angulosos, de glabros a pubérulos, con marcadas costillas longitudinales en seco. **Hojas** simples, alternas, limbo ovado a elíptico, de 0.5 a 4.5 cm largo x 0.4 cm ancho; ápice de obtuso a redondeado, a veces emarginado, base cuneada o atenuada, raras veces truncada, margen entera a levemente crenada; glabras, diminutas papilas a lo largo de las venas, cuerpos de sílice a menudo presentes (> 30x), de 5 a 12 venas secundarias subopuestas y alternas sobre la vena media,

ascendentes; pecíolos de 0.5 a 5 cm largos, inconspicuamente alados, acanalados, glabrescentes, de patentes a ascendentes. **Inflorescencias** que son axilares y terminal, esta última más desarrollada, hasta 15 cm de larga, erectas espiciformes, atenuándose hacia el ápice, a veces ramificadas desde la base. **Flores** dispuestas en cimas agregadas y congestas, ocultando el raquis, subtendidas por una bráctea; ésta de 1 a 1.5 mm larga (sin incluir la arista), escariosa, con una vena media, ovada, con arista dorsal *ca.* 0.5 mm larga; perianto tepaloide, escamoso, 5 piezas, *ca.* 2 mm largo x 0.4-0.5 mm ancho, oblongo-elípticas, de ápice acuminado. ***Flores femeninas*** en mayor número que las masculinas; ovario ovoide, uniseminado, *ca.* 1 mm largo, apicalmente convexo, coronado por 3 estigmas, *ca.* 0.7 mm largos, filiformes, papilosos. ***Flores masculinas*** con androceo de 5 estambres, exertos en antesis, *ca.* 1 mm largos, oblongos, base sagitada, con filamentos 1.5 mm largos, dehiscencia longitudinal. **Fruto** dehiscente, tipo pixidio, *ca.* 1.5 mm largo, uniseminado. **Semilla** lenticular, color negro, brillante, glabra, de 0.7 a 1 mm diámetro, margen engrosada.

Asteraceae (Compositae)

2. ***Eclipta alba* (L.) Hassk.**
   sin. *Verbesina alba* L., *V. postrata* L., *Eclipta punctata* Jacq., *Bellis ramosa* Jacq., *Eclipta erecta* L., *Eclipta prostrata* (L.) L., *Micrelium tolak* Forsk.

   NV: botón blanco, yerba de laguna, palo de agua, antonio-díaz, tangolele, pimienta, chisacá

Hierba de decumbente a erecta. **Tallos** teretes, rojizos en fresco, levemente estriados cuando secos, pubérulos, con tricomas cortos y rígidos, < 0.5 mm largos. **Hojas** opuestas, estrigosas, tricomas *ca.* 1 mm largos; limbo ovado-elíptico o lanceolado, de 1 a 7 cm largo x 0.5 a 2.5 cm ancho, margen levemente denticulada, base atenuada, ápice agudo, 3-venada desde la base, venación braquidódroma, consistencia membranosa. **Inflorescencias** dispuestas en el ápice de las ramas y en las axilas de las hojas, de 1 a 3 cabezuelas, de 4 a 6 mm largas, acampanadas; involucro biseriado de 4 a 5 brácteas cada uno, de 3 a 5 mm largas, ovadas, ápice acuminado, piloso; receptáculo convexo. **Flores** subtendidas por una pálea lineal, de 2 a 3 mm larga, carente en las flores periféricas; éstas son femeninas, radiadas, de color blanco; las flores internas (de 30 a 40) hermafroditas, discoides y radiadas, de color amarillo. Corola de flores radiadas liguladas, a veces bífida hacia el ápice, tubo de la corola *ca.* 0.5 mm largo, de margen engrosada y subinvoluta; papus de diminutos cilios, *ca.* 0.1 mm largo; 4 estambres, adnados en el tercio basal de la longitud de la corola, anteras concrescentes, de 0.6 a 0.8 mm largas, basalmente equiláteras, carentes de conectivo prolongado; en flores discordes, nectario copuliforme hacia la base del estilo, ausente en flores radiadas, estigma papiloso; ovario ínfero plano, menos que 1.3 mm largo, oblongo, estrecho en la base. **Fruto** en aquenio, de 2 a 2.5 mm largo, oblongo-ovoide, base estrecha y aguda, ápice plano con un ligero papus coroniforme, superficie rugosa tuberculada.

Caesalpinaceae

3. ***Senna obtusifolia* (L.) H.S. Irwin & Barneby**
   sin. *Cassia tora* (L.) Roxb., *Emelista tora* (L.) Britton & Rose

   NV: bicho, chilinchil, bicho macho

Hierba fruticosa, erecta, ramificada, de 0.5 a 2 m de alta. **Tallos** estriados principalmente en ramas nuevas, esencialmente glabros, verdes cambiando a castaño al madurar. **Hojas** compuestas, paripinnadas, de 2 a 3 pares de folíolos; folíolo de 2 a 6 cm largo x 1 a 3 cm ancho, obtuso; ápice redondeado o mucronato o retuso; base asimétrica, obtusa, margen entera y ciliada, haz y envés glabros; pecíolo de 15 a 45 mm largo, acanalado adaxialmente, con pulvínulo basal; raquis de 1.7 a 3 cm largo, acanalado, pubérulo; estipulas hasta de 1.5 cm largas, libres, lineales, pubérulas en la margen; en medio de los 2 pares de folíolos inferiores aparece una glándula con forma de vírgula de color marrón a castaño, *ca.* 2 mm larga. **Inflorescencia** en racimo terminal o axilar indeterminado; brácteas hasta de 5 mm largas, lineales o setáceas, pubérulas; pedicelo de 1 a 1.6 mm largo; cáliz de 5 sépalos, de 4 a 10 mm largos, ovalados, convexos, verde pálido, marginalmente ciliados y libres; corola de 5 pétalos amarillos, libres, ungiculados, desiguales (2-2-1), el central hasta 2 cm largo, con ápice bilobado; gineceo con ovario súpero, hasta 2 cm largo, lineal, curvado hacia los estambres, pubérulo; androceo con 7 estambres fértiles, 3 anteras más largas, de 4 a 5 mm largas, apiculadas y curvadas, 4 anteras más cortas, hasta 3 mm largas, rectas, 3 estaminodios. **Fruto** en legumbre hasta de 20 cm larga x *ca.* 5 mm ancha, lineal, cilíndrica, cuadrangular al secar, recurvada, multiseminada, ápice agudo. **Semillas** ovadas, cuadrangulares con vértices redondeados al secar.

N. del E.: La expresión '(2-2-1)' indica 2 pétalos iguales de un tamaño, otros 2 iguales de otro tamaño y un tercero completamente diferente.

Commelinaceae

4. ***Commelina erecta* L.**
   sin. *Commelina elegans* Kunth

   NV: suelda-consuelda

Commelina erecta y *C. diffusa* pueden ser fácilmente confundidas. Casi toda especie de *Commelina* que crece en las zonas arroceras de América Latina se define como *C. diffusa*. Las dos especies son, aparentemente, iguales en hábito, inflorescencia y color de la corola, pero *C. erecta* tiene 1 pétalo atrofiado y su espata es sésil; *C. diffusa*, en cambio, tiene los 3 pétalos desarrollados y su espata es pedicelada, entre otras características.

Hierba postrada, reptante. **Tallos** suculentos, de ramas ascendentes, teretes, glabros, esparcidamente pubérulos cerca de los nudos, con tricomas simples, diminutos, crespos, < 0.3 mm largos; estriados al secado. **Hojas** con la vaina envolvente, cerrada, hasta 2 cm larga, de margen apicalmente auriculada, pilosa, con tricomas erectos, simples, filiformes, *ca.* 2 mm largos; limbo lanceolado, hasta 10 cm largo x 2 cm ancho, glabro, con venación paralela. **Inflorescencia** en cimas simples, de 2 a 6 (10), subtendida por una espata foliosa, cordiforme, de 1 a 2 cm larga x 1.5 a 3 cm ancha, plegada, pubérula o pubescente, que cubre las flores inmaduras; pedúnculo pubérulo, < 1 cm largo; pedicelos < 5 mm largos. **Flores** zigomorfas, hermafroditas; cáliz con 3 sépalos, membranáceos, de 3 a 4 mm largos x *ca.* 2 mm anchos, 2 de estos soldados cerca de la mitad de su longitud, ampliamente ovados, el tercero carinado; corola azul, 3 pétalos, 2 de estos unguiculados, soldados parcialmente por el limbo, de 8 a 15 mm largos x 8 a 12 mm anchos, el tercero vestigial, lineal, < 5 mm largo; androceo con 6 estambres, 3 estériles, cortos, de

4 a 4.5 mm largos, con las anteras cruciformes, 3 fértiles de mayor tamaño, de 5 a 6 mm largos, anteras bitecales, oblongas, de filamentos glabros; ovario súpero, *ca.* 1 mm largo, ovoide, de estilo trífido, circinado apicalmente, < 10 mm largo, estigma capitado, *ca.* 0.1 mm largo. **Fruto** en cápsula, cubierta por la espata, de dehiscencia valvar, 2(3) celdas, 1 indehiscente, semillas 1-0. **Semillas** de elipsoides a ovoides, de 2 a 3 mm largas x 2 mm anchas; color café oscuro, superficie diminutamente papilosa.

N. del E.: En la expresión 'de 2 a 6 (10)', (10) significa que habrá, como máximo, 10 flores en la inflorescencia.

5. ***Murdannia nudiflora* (L.) Brenan**
   sin. *Aneilema malabaricum* (L. Merr., *Aneilema nudiflorum* R. Br., *Murdania malabarica* (L.) A. Brückn., *Tradescantia malabarica* L., *Commelina nudiflora* L.

   NV: piñita, suelda-consuelda, leptorreo, colchón de pobre

Hierba decumbente, reptante. **Tallos** teretes, suculentos, nudos color rojizo; glabros. **Hojas** envainadoras con pelos marginales de < 1 mm largos; vaina cerrada, cilíndrica, de 5 a 10 mm larga; limbo de lanceolado a oblongo-lanceolado, de 1.5 a 6 cm largo x 0.5 a 1 cm ancho, ápice agudo. **Inflorescencias** terminal y axilares sobre las ramas terminales, que nacen directamente de los nudos, carecen de espata; con cimas laxas, a veces parecen subumbeladas, de 1 a 5 cm largas; bractéolas seudo-envainadoras, de oblongas a lanceoladas, *ca.* 2 mm largas x 1 mm anchas, glabras. **Flores** hermafroditas, pediceladas, los pedicelos de < 5 mm largos; cáliz de 3 sépalos, libres, iguales, ovados, de 2 a 3 mm largos. x *ca.* 0.5 mm ancho, de color blancuzco; corola de 3 pétalos, libres, equiláteros, ovados, de 1.5 a 2 mm largos x 0.3 a 0.4 mm anchos, de color liláceo; androceo de 6 estambres, 2 largos y fértiles, con filamentos *ca.* 0.6 mm largos, anteras oblongas, *ca.* 0.4 mm largas, bitecales, 4 estambres atrofiados, < 0.5 mm largos, en todos los casos filamentos pilosos; ovario súpero, 3-capelar, biovulado. **Fruto** en cápsula, ovoide, *ca.* 3 mm larga, 3 celdas, cada una de éstas con 2 semillas. **Semillas** dehiscentes, glabras, de color castaño, irregulares, de 1.5 a 1.8 mm largas, superficie rugosa con diminutos tricomas glandulares (> 30x).

Cyperaceae

6. ***Cyperus esculentus* L.**
   sin. *Cyperus aureus* Ten., *Cyperus tuberosus* Pursh., *Cyperus nervosus* Bert., *Chlorocyperus aureus* Pall.

   NV: coquito amarillo, coyolillo

Planta de porte mediano, glabra, perenne, se reproduce tanto por semilla como por estructuras vegetativas, con sistema subterráneo constituido por rizomas, tubérculos, bulbos basales y raíces. **Rizomas** extendidos, que terminan generalmente en un tubérculo; normalmente la base de la planta está constituida por una estructura engrosada llamada bulbo basal, de la cual emergen tallos aéreos; los rizomas se forman de un bulbo basal, son suaves, carnosos, recubiertos por catafilos; los tubérculos son aromáticos, globosos u ovoides, de 1 a 2 cm de diámetro. **Tallos** erectos, simples, sustentan una sola inflorescencia, trígonos, glabros, de 30 a 60 cm largos. **Hojas** numerosas, de longitud semejante a la del tallo, de 5 a 6 mm ancho, con sección en V (quilladas), que emergen en conjuntos de tres, lineales, glabras, de márgenes ásperos, de coloración verde pálido; involucro formado por 3 a 6 brácteas, de longitud variable, más cortas o largas que las ramas de la inflorescencia.

Inflorescencia en umbela simple o compuesta, con 5 a 12 ramas de longitud variable, hasta 12 y 16 cm largas; simples o compuestas, con 1 a 3 ramificaciones cortas; cada ramificación termina en espiga formada por 5 a 25 espiguillas distanciadas y dispuestas en un raquis trígono y escabroso; espiguillas divaricadas, lineales, de 5 a 30 mm largas y de 1 a 3 mm anchas, maduras se tornan túrgidas, no comprimidas, de color amarrillo a castaño amarillento. **Flores** de 8 a 40, raquilla alada; glumas laxamente imbricadas, de 2.5 a 4.0 mm largas, quilladas, de color amarillo hasta café pálido, quilla de color verde, membranáceas, ovado-oblongas, de ápice obtuso; 6-nervadas, con nervaduras realzadas. **Flores** 3-estaminadas, de estigma trífido. **Fruto** en aquenio, de 1.5 a 2 mm largo, ampliamente oblongo, trígono, de ápice obtuso, no apiculado, de color castaño oscuro, ligeramente brillante, con superficie bruscamente tuberculada.

7. ***Cyperus iria* L.**
   sin. *Chlorocyperus iria* (L.) Rikli, *Cyperus santonoci* Rottoell, *Cyperus panicoides* Lam., *Cyperus resinosus* Hoechst

   NV: menta, ajillo

Planta anual, moderadamente cespitosa, de porte mediano, toda con olor a menta. **Sistema radical** subterráneo constituido por raíces fasciculadas, sin rizomas ni tubérculos. **Tallos** finos, trígonos, glabros, de coloración verde amarillenta, de 30 a 50 cm largos. **Hojas** lineal-lanceoladas, pocas, generalmente más cortas que el tallo, de 3 a 6 mm anchas, lisas y glabras, con márgenes ásperos hacia la parte apical. **Inflorescencia** en umbela de espigas, de tamaño variable, divergente, abierta; espigas alargadas, de 1 a 3 cm largas; 3-7 brácteas involucrales, desiguales; espiguillas pediceladas, densamente agrupadas, en racimos orientados en forma ascendente a lo largo del raquis, de 5 a 15 espiguillas por racimo; espiguillas de forma lineal-elíptica, de 5 a 8 mm largas x 1.5 a 2 mm anchas, color amarillo oro, con 6 a 15 flores cada una. **Flores** con 3 estigmas; glumas distanciadas entre sí, oblongo-elípticas, de ápice obtuso, cortamente apiculadas o no apiculadas, de 1 a 1.5 mm largas x *ca.* 1 mm anchas, de color amarillo, quilla prominente de color verde, consistencia membranácea, 3-nervadas hacia el centro de la gluma. **Fruto** en aquenio, obovado, trígono, *ca.* 1 mm largo, de color castaño, superficie reticulada.

8. ***Cyperus rotundus* L.**
   sin. *Chlorocyperus rotundus* (L.) Palla

   NV: coquito, coquito morado, coyolillo, tiririca

Esta especie es de amplia distribución geográfica y tiene gran importancia económica.

Planta perenne, cespitosa, glabra. **Sistema radical** subterráneo constituido por rizomas, tubérculos, bulbos basales y raíces. De un bulbo basal se forman cadenas de rizomas y tubérculos, que se extienden horizontalmente y pueden profundizar hasta 50 cm en el suelo. Un ***bulbo basal*** es una estructura engrosada en la base de la planta, da origen a brotes aéreos, hojas y tallos o a rizomas; éstos se diferencian dando origen a tubérculos; de las yemas de cada tubérculo se forman nuevamente rizomas o brotes aéreos. Los ***rizomas*** y ***tubérculos*** jóvenes son carnosos y de color blancuzco; al madurar, se lignifican y toman color café oscuro y consistencia fibrosa, endurecida; cada tubérculo tiene de 6 a 9 yemas, mide hasta 2.5 cm largo x 1 cm ancho. **Tallo** trígono, de superficie lisa, de color verde brillante, de

10 a 50 cm largo x 5 mm ancho. **Hojas** nacen basalmente, dispuestas en 3 series, de vaina membranosa, cerrada, de lámina foliar lineal-lanceolada, plana, sulcada longitudinalmente; más largas generalmente que el tallo, de 3 a 5 mm anchas, ápice agudo, color verde brillante; involucro formado por 3 a 4 hojas involucrales, semejantes a hojas caulinares, de longitud desigual, pueden ser más largas que ramas de la inflorescencia. **Inflorescencia** en umbela simple o compuesta, con 3 a 9 ramas de longitud desigual, hasta 5 cm largas, guarnecidas por pequeños prófilos; del ápice de cada rama nacen espiguillas muy vistosas, lineal-lanceoladas, de color rojizo oscuro a rojizo castaño, de 0.8 a 2.5 cm largas x 2 mm anchas, comprimidas, con ápice agudo; cada espiguilla contiene muchas flores (hasta 40); glumas dispuestas en dos series, de 2.5 a 3.5 mm largas, laxamente imbricadas, ovado-oblongas, de ápice obtuso, con 7 a 9 nervaduras, quilladas, con quilla de color verde y lados de coloración rojiza. **Fruto** en aquenio trígono de lados redondeados, de elipsoide a oblongo, color castaño oscuro a negro, de 1.2 a 1.5 mm largo x 0.5 a 0.7 mm ancho, de ápice cortamente apiculado, base atenuada, de superficie brillante, minutamente reticulada.

9. ***Fimbristylis miliacea* (L.) Vahl**
   sin. *Fimbristylis littoralis* Gaudich (sinónimo más común), *Scirpus miliaceus* L.

   NV: trompemocho, barba de indio

Planta anual, glabra, densamente cespitosa. **Sistema radical** subterráneo constituido por raíces fasciculadas. **Tallos** de 10 a 70 cm largos, de 1 mm gruesos, suavemente angulados, glabros, que se doblan o vuelcan fácilmente. **Hojas** bi-orientadas, lineales, hasta de 40 cm largas, de 1 a 3 mm anchas, de bordes escaberulosos, vaina cerrada de color verde o café pálido; involucro de la inflorescencia ausente o representado por una vaina foliar más corta que las ramas de la inflorescencia. **Inflorescencia** en umbela compuesta, abierta, constituida por 3 a 6 ramas o fascículos; espiguillas de 2 a 3 mm largas, de subglobosas a globosas, de color café a castaño rojizo, con 20 a 40 flores; espiguillas generalmente dispuestas en grupos de 3, una central sésil o muy cortamente pedicelada, dos laterales pediceladas; glumas en espiral, de 1 a 1.5 mm largas, ovadas, redondeadas en el ápice, quilladas, de color café pajizo, con bordes membranosos, 1-nervadas; estigma trífido. **Fruto** en aquenio de 0.5 mm largo, obovoide, trígono de ángulos suaves, de color café claro, con superficie suavemente reticulada y tuberculada.

Euphorbiaceae

10. ***Caperonia palustris* (L.) A. St. Hil.**
    sin. *Croton palustris* L.

    NV: botoncillo, botón blanco, caperonia, cienaguera, gatón, yerba de agua

Hierba erecta, monoica, paludosa, de 0.5 a 1.5 m alta. **Tallos** fistulosos, cilíndricos, estriados, poco ramificados, con pelos hirsutos horizontales glandulosos, blancuzcos, más abundantes en las partes jóvenes. **Hojas** simples, alternas, de 7 a 15 cm largas x 1 a 6 cm anchas, ovado-lanceoladas a angostamente lanceoladas, base subcordada, truncada o redondeada, ápice agudo apiculado, margen serrado escabroso, láminas glabras, excepto por pelos sobre las venas medias y laterales; pecíolos de 5 a 25 cm largos, fuertemente acanalados, con pelos hirsutos glandulares, estípulas de 3 a 8 mm largas, lanceoladas, con 1-2 espuelas laterales. **Inflorescencia** en racimo espiciforme axilar, con pedúnculo de 3 a 8 cm largo, con 3 a 5 flores femeninas inferiores, subtendidas por una

bráctea que abraza el pedicelo, *ca.* 10 flores masculinas apicales subtendidas por una bráctea que abraza el pedicelo. ***Flor masculina*** con 5 sépalos *ca.* 1.5 mm largos, verdes, soldados en el primer tercio, elípticos con 5 pétalos *ca.* 2 mm largos, iguales o subiguales, blancos, oblongos, unguiculados, glabros; 10 estambres en 2 verticilos, anteras redondeadas, rudimento del ovario cilíndrico. ***Flor femenina*** verdosa, con 5 sépalos de 2 a 4 mm largos, ovales, acuminados, con pelos setáceos glandulosos en bordes y dorso, pétalos espatulados; ovario globoso, deprimido, densamente cubierto de glándulas fusiformes, 3-loculado; estilo corto, oculto entre las glándulas del ovario, generalmente 15-lacinado. **Fruto** en cápsula trilocal, muricada, acompañada por cáliz ampliado. **Semillas** *ca.* 3 mm largas, grisáceas, subesféricas, con laminillas transparentes en forma de crestas.

Fabaceae

11. ***Macroptilium lathyroides* (L.) Urban**
    sin. *Lotus maritimus* L., *Lotus maritimus* Vell, *Phaseolus crotalarioides* Mart. ex Benth., *Phaseolus hastifolius* Mart. ex Benth., *Phaseolus lathyroides* L., *Phaseolus maritimus* Benth., *Phaseolus maritimus* Salzm. ex Benth., *Phaseolus psoraleoides* Wight. ex Arn., *Phaseolus semierectus* L., *Phaseolus strictus* Braun & Bouché

    NV: chocho de sabana, frijolillo, moradita

Hierba erecta, hasta 150 cm alta. **Tallos** sulcados, de base glabrescente y pubescencia que aumenta ascendentemente hasta que las partes apicales son pubescentes. **Hojas** pinnadas, trifoliadas, alternas; folíolos velutinos por el haz, glabrescentes por el envés, elípticos, con márgenes enteras, de venación 3-palmeada; folíolo superior de 3 a 6 cm largo x 1.5 a 3.5 cm ancho, rombo-lanceolado a ovado, con ápice obtuso-mucronado, base obtusa; folíolos laterales de 2.3 a 5 cm largos x 1.2 a 3 cm anchos, levemente inequiláteros, con ápice obtuso-mucronado, base redondeada a truncada; pecíolos sulcados, de 2 a 5 cm largos, pubescentes basalmente, pulvínulos congestamente pubescentes, raquis de 0.8 a 1.9 cm largo; estípulas libres, persistentes, subuladas, glabras o ciliadas, con estipelas lineales. **Inflorescencia** en racimo axilar, con flores esparcidas, pedúnculo hasta 50 cm largo. **Flores** cortamente pediceladas, vistosas, con cáliz de 5 a 8 mm largo, piloso, de 5 lóbulos lanceolados; corola papilionada, 3 veces más larga que el cáliz, con estandarte de rosado a rojo-ocre, obovado-espatulado, con base cuneada *ca.* 1.5 cm larga x *ca.* 1 cm ancha, quilla falcada *ca.* 1.5 cm larga, morada, unguiculada, con alas *ca.* 2 cm largas. unguiculadas, moradas, de limbo oblongo sigmoideo; 10 estambres, diadelfos, el vexilar libre casi desde la base sigmoidea, anteras alargadas *ca.* 0.7 cm, ovario pubescente, lineal, *ca.* 8 mm largo, estilo sigmoideo, pubescente hasta la mitad. **Frutos** en legumbre, multiseminada, velutinosa.

Limnocharitaceae

12. ***Limnocharis flava* (L.) Buchenau**
    sin. *Alisma flava* L., *Limnocharis emarginata* H. & B., *Limnocharis plumieri* Richard

    NV: Berros

Hierba suculenta, emergente. **Rizoma** erecto, emite raíces adventicias, rico en tejidos aerenquimatosos, con exodermis suberizada. **Hojas** suculentas, simples, con pecíolos largos, dispuestas en roseta

basal, envainadas en la base; limbo de color verde pálido, ovado, oblongo-ovado u ovalado, de 5 a 20 cm largo x 3 a 15 cm ancho, ápice obtuso a redondeado, mucronado, base redondeada a redondeado-cuneada; lámina glabra, venación 9-11, curvinervia, venas paralelas transversales a las primarias; pecíolos fistulosos, trigonales, erguidos, de 10 a 40 (> 40) cm largos x 0.5 a 1 cm diámetro; suculentos. **Inflorescencia** subtendida por un escapo, de 1 a 1.5 cm diámetro, de igual longitud o mayor que los pecíolos; cimas umbeliformes, generalmente de 3 flores, subtendidas por una bráctea suculenta, de 1.5 a 3 cm larga, ovada a oblonga, de 1 a 1.5 cm larga, ápice emarginado o mucronado; pedicelos alados, suculentos, de 2 a 5 cm largos. **Flores** hermafroditas, perianto biseriado, libre; cáliz de 3 sépalos suculentos, de 1.5 a 2 cm largos x 1 a 1.5 cm anchos, ovados, ápice redondeado a obtuso; corola de 3 pétalos, hasta 2 cm largos x 1 a 1.5 cm anchos, color blanco, membranáceos, caducos, ovalados, con 7 a 11 venas; androceo generalmente 2-verticilado, con numerosos estambres (> 10), con filamentos planos, de 8 a 12 mm largos; anteras oblongas, de 1.5 a 3 mm largas, de dehiscencia longitudinal; gineceo con *ca.* 20 carpelos, planos, fusionados axialmente por un eje, alargados, de 6 a 8 mm largos. **Fruto** agregado, globoso-elipsoide, que desarrolla un folículo de cada carpelo, folículos sujetos por un eje común, de 1 a 1.5 cm largos. **Semillas** *ca.* 1 mm largas, forma de herradura, papilosas, multicostadas transversalmente.

Onagraceae

13. ***Ludwigia decurrens* Walter**
sin. *Diplandra decurrens* (Walter) Raf., *Jussiaea alata* G. Don., *Jussiaea bertonii* H. Lévi, *Jussiaea decurrens* (Walter) DC., *Jussiaea palustris* G. F. W. Meyer, *Jussiaea pterophora* Mia

NV: palo de agua, clavito, clavito de agua, echipipín

Hierba anual, de 0.3 a 2 m alta. **Tallo** solitario, con muchas ramas primarias laterales hacia los $^{2}/_{3}$ superiores, con 4 ángulos alados desde la inserción de las hojas decurrentes, alas de 1 a 2 mm anchas; raíces sumergidas con neumatóforos inflados. **Hojas** de 2 a 12 cm largas x 0.4 a 3 cm anchas, lanceoladas, largamente elípticas o lineales, glabras o glabrescentes, sésiles o casi sésiles, de base cuneada, ápice agudo con una glándula ungicular globosa en el envés, con 11 a 16 venas secundarias a lado y lado de la vena primaria; estipulas adnadas, que truncan la conexión del limbo decurrente con las alas del tallo. **Flores** solitarias en las axilas apicales; pedicelos de 1 a 5 mm largos, 4 sépalos, de 7 a 10 mm largos x *ca.* 4 mm anchos, deltoide-lanceolados; pétalos de 8 a 12 mm largos, amarillos, obovados, libres; 8 estambres, anteras de 2 a 3 mm largas, ventrifijas; polen cae en tétradas; disco nectario en base del ovario con collar de pelos blancos alrededor; estilo de 1.5 a 2.5 mm largo, estigma de 1.5 a 2 mm diámetro, redondo, globoso; ovario de 0.7 a 1.5 cm largo, ínfero, 4-angulado, 4-alado, con brácteas *ca.* 1 mm largas, deltoides. **Fruto** en cápsula de 1 a 2 cm larga x 3 a 7 mm diámetro, de color marrón pálido, con 4 costillas oscuras y aladas, con 4 lóculos. **Semillas** de 0.4 a 0.6 mm largas, pluriseriadas en cada lóculo, libres, de color marrón pálido, el rafe es $^{1}/_{5}$ del diámetro del cuerpo.

14. ***Ludwigia erecta* (L.) H. Hara**
sin. *Jussiaea acuminata* Sw., *Jussiaea altisima* Perr. ex DC., *Jussiaea erecta* L., *Jussiaea onagra* Mill., *Jussiaea plumeriana* Bello, *Jussiaea ramona* Jacq. ex Rchb.

NV: palo de agua, palo de laguna, mata de ciénaga

Hierba erecta, anual, generalmente de 0.3 a 2.5 mm alta, que presenta líneas de oxalato de calcio sobre todas las estructuras excepto los pétalos. **Tallo** principal con ramas primarias abundantes, rojizo o verde, glabro, de ramas cuadrangulares afiladas, decurrentes desde la base de las hojas. **Hojas** de 2 a 13 cm largas x 0.4 a 4 cm anchas, de lanceoladas a elipto-lanceoladas, de agudas en ambos extremos a subacuminadas en ápice, finamente papilosas, con pecíolo de 2 a 15 mm largo; de 13 a 25 venas secundarias a lado y lado de vena primaria. **Flores** solitarias en las axilas superiores, sésiles, con 4 sépalos de 3 a 6 mm largos, acuminados, de lanceolados a deltoides, glabros; 4 pétalos, de 3.5 a 5 mm largos, amarillos, obovados, libres; 8 estambres, *ca.* 1.3 mm largos, con anteras de 0.7 a 1 mm largas x *ca.* 0.4 mm anchas, polen que sale en tétradas; disco nectario en base del ovario con collar de pelos blancos alrededor; estilo hasta 1.5 mm largo, estigma *ca.* 1 mm diámetro, cupulado; bractéolas *ca.* 0.5 mm largas en base del hipanto; ovario *ca.* 7 mm largo, ínfero, 4-loculado, multiseminado. **Fruto** en cápsula de 0.8 a 1.9 cm larga x 2 a 3 mm diámetro, de glabra a glabrescente, 4-angular, oblonga, con cáliz persistente. **Semillas** de 0.3 a 0.6 mm largas, globoso-oblongas, pluriseriadas en cada lóculo, libres, de color café pálido.

Poaceae

Género: *Digitaria*

Las tres especies más comunes son *D. horizontalis*, *D. ciliaris* y *D. bicornis*. *D. sanguinalis* es mucho menos frecuente que las anteriores.

En décadas pasadas, toda especie del género *Digitaria* asociada con campos de arroz se identificaba como *D. sanguinalis* (L.) Scop.; sin embargo, trabajos recientes indican que *D. horizontalis*, *D. ciliaris* y *D. bicornis* eran confundidas con *D. sanguinalis* (Fuentes et al., 2006).

A continuación se presenta una clave para separar las tres especies del género *Digitaria* más frecuentes en los arrozales, y se describe luego a *D. bicornis* porque es la especie más diseminada:

Clave:

1. Pedicelo de la espiguilla pedicelada más corto que la mitad de la espiguilla sésil, espiguilla subtendida por un tricoma; vaina pubescente; nudos y entrenudos glabros: ..... *D. horizontalis*
1´. Pedicelo de la espiguilla pedicelada más largo que la mitad de la espiguilla sésil, base de la espiguilla sin tricoma, vaina glabra o pubescente, nudos glabros o pilosos
    2. Anteras de 1 mm largas; vaina pubescente; nudos glabros: ..... *D. ciliaris*
    2´. Anteras más cortas que 1 mm; vaina glabrescente, pelos esparcidos sólo en la base; nudos pubérulos: .... *D. bicornis*

15. ***Digitaria bicornis* (Lam.) Roemer et Schultes**
sin. *Digitaria diversiflora* Swallen, *Paspalum bicorne* Lam.

NV: gaudín, guarda rocío, hierba coneja

Hierba de **tallos** decumbentes, de 10 a 85 cm altos, que emiten raíces de los nudos. **Macollas** erectas; entrenudos glabros, nudos con pelos ralos. **Hojas** con vainas que tienen pelos esparcidos hacia la base, lígula de 2 a 4 mm larga; lámina de 7 a 16 cm larga x 0.5 a 0.7 cm ancha, lineales, glabrescentes. **Inflorescencia** de 10 a 16 cm larga, con 8 a 10 racimos de 7 a 16 cm largos, los inferiores verticilados, los superiores

alternos; eje de inflorescencia de 19 a 35 cm largo, raquis de 0.7 a 1.1 mm ancho, plano, marginalmente escabroso. ***Espiguillas*** de 2.9 a 3.3 mm largas, comprimidas dorsalmente, desarticuladas debajo de las glumas, pareadas, una subsésil infértil, la otra pedicelada y fértil; gluma inferior hasta 2.5 mm larga, enervia; gluma superior tan larga como la espiguilla, 3-nervada, con margen fuertemente ciliada; flósculo inferior estéril, flósculo superior bisexual; lemma inferior tan larga como la espiguilla; lemma superior escasamente más corta que la lemma inferior; 2 lodículas; 3 anteras, basifijas, con ápice divido hasta la mitad; 2 estigmas, plumosos. **Fruto** en cariópside, de 2 mm largo, oblongo-elíptico.

16. ***Echinochloa colona* (L.) Link**
sin. *Panicum colonum* L.

NV: arrocillo, grama salada, liendrepuerco, liendre de puerco, paja salada

Hierba cespitosa, anual. **Tallos** de 20 a 90 cm altos; nudos enraizadores, híspidos o glabros, entrenudos glabros. **Hojas** con vainas glabras, lígula ausente, con collar pubérulo; lámina de 7 a 24 cm larga x 4 a 10 mm ancha, velutina, con margen púrpura. **Inflorescencia** en panícula terminal de racimos unilaterales, de 6 a 15 cm larga; de 7 a 14 racimos, de 0.7 a 3.3 cm largos, simples, con tricomas filiformes de hasta 3 mm largos, frecuentes en la base; raquis con tricomas simples, *ca.* 0.2 mm largo. ***Espiguillas*** de 2 a 3 mm largas, dispuestas en 4 hileras, generalmente pareadas, aplanadas dorsalmente, con desarticulación por debajo de las glumas, de ápice agudo o apiculado; gluma inferior de 1 a 1.5 mm larga, 3-nervada, adaxialmente glabra, abaxialmente pubérula, con tricomas simples principalmente sobre las venas; gluma superior casi tan larga como la espiguilla, 5-nervada; flósculo inferior estéril; palea inferior casi tan larga como la lemma superior, pero más angosta; flósculo superior fértil, *ca.* 2 mm largo; 3 anteras, de 0.7 a 0.8 mm largas; 2 estigmas plumosos. **Fruto** en cariópside, de 1.5 mm largo, aplanado-convexo, ampliamente elíptico.

17. ***Eleusine indica* (L.) Gaertn.**
sin. *Eleusine gracilis* Salisb., *Cynosurus indicus* L., *Cynodon indicus* Rasp., *Chloris repens* Steud.

NV: grama de horqueta, pata de gallina

Hierba anual. **Tallos** de 15 a 70 cm altos, erectos, ramificados, de entrenudos fistulosos y glabros. **Hojas** con vaina glabra excepto por tricomas largos sobre márgenes superiores y garganta; lígula *ca.* 1 mm larga; lámina de 10 a 25 cm larga x 4 a 6 mm ancha, glabra por el envés, con tricomas ralos y largos en el haz. **Inflorescencia** es un verticilo de 5 a 8 espigas, de 6 a 10 cm largo; 1 ó 2 espigas tienen de 1 a 5 cm largas, dispuestas debajo del verticilo; raquis *ca.* 1 mm ancho. ***Espiguillas*** sésiles, de 5 a 7 mm largas, comprimidas lateralmente, dispuestas en 2 hileras sobre lado inferior del raquis aplanado, con 4 a 7 flósculos, el superior estéril; gluma inferior de 1.8 a 2.5 mm larga, 1-nervada; gluma superior de 2.4 a 3.1 mm larga, 5-nervada; lemmas de 2 a 3 mm largas, glabras, generalmente 3-nervadas; pálea ligeramente más corta que la lemma; 2 lodículas, 3 estambres, *ca.* 0.7 mm largos, 2 estilos plumosos. **Fruto** en utrículo. **Semilla** rugosa, envuelta por un pericarpio delgado.

18. ***Ischaemum rugosum* Salisb.**
sin. *Meoschium rugosum* (Salisb.) Nees

NV: falsa caminadora

Hierba anual. **Tallo** de 50 a 130 cm alto, erecto o decumbente en la base, ramificado, con entrenudos glabros y fistulosos, nudos pilosos. **Hojas** con vaina ciliada, pilosa hacia el ápice, algunas veces con la margen violácea; lígula de 3 a 5 mm larga, glabra; lámina de 4 a 20 cm larga x 6 a 12 mm ancha, pubescente, de tonalidades moradas por el haz. **Inflorescencia** compuesta por 2 racimos, de 3 a 8 cm largos, apretadamente adpresos, con apariencia de espiga solitaria y cilíndrica; raquis articulado. ***Espiguillas*** pareadas, de 3.8 a 5 mm largas, las dos espiguillas y el entrenudo del raquis caedizos como una unidad, una espiguilla cortamente pedicelada y otra sésil, esta última con 2 flósculos, el inferior 3-estaminado y el superior pistilado ó bisexual; gluma inferior tan larga como la espiguilla, sus $^{3}/_{5}$ inferiores endurecidos, amarillentos, corrugados transversalmente, con nervaduras no visibles, sus $^{2}/_{5}$ superiores herbáceos, verdosos, de ápice obtuso y cortamente ciliada hacia el ápice; gluma superior tan larga como la inferior, membranácea; lemma superior hialina, 2-lobada hacia la mitad, aristada entre los lóbulos, la arista geniculada y torcida, de color marrón en la parte basal y blanquecina en la parte terminal, hasta de 2.5 cm larga; 3 anteras, de 1.3 a 1.7 mm largas; 2 estilos plumosos. **Fruto** en cariópside, *ca.* 2.5 mm largo, de triangular a oblongo.

Género: *Leptochloa*

El complejo de especies de *Leptochloa* asociadas con el agroecosistema arrocero está conformado por cuatro especies, por lo menos: *L. mucronata*, *L. virgata, L. uninervia* y *L. scabra.*

Como se explicó en el género *Digitaria*, toda especie de *Leptochloa* que crecía en los campos de arroz se identificaba como *L. filiformis,* pero se sabe que *L. filiformis* es un sinónimo de *L. mucronata* (Fuentes et al., 2006).

A continuación se presenta una clave para separar las cuatro especies y se describe luego a *L. mucronata* porque es la especie más común:

Clave:

1. Glumas tanto o más largas que el primer flósculo; frutos lateralmente aplanado-globosos: ..... *L. mucronata*
1´. Glumas más pequeñas que el primer flósculo; frutos no lateralmente comprimidos
    2. Lemas mucronadas; frutos elípticos
        3. Frutos ventralmente sulcado, naviculares: ..... *L. virgata*
        3´. Frutos no sulcados, aplanados: ..... *L. uninervia*
    2´. Lemas no mucronadas; frutos no sulcados, cilíndricos: ..... *L.scabra*

19. ***Leptochloa mucronata* (Michaux) Kunth**

sin. *Eleusine mucronata* Michaux, *Festuca filiformis* Lam., *Leptochloa filiformis* (Lam.) P. Beauv., *Leptochloa filiformis* (Pers.) P. Beauv.

NV: paja mona, paja de loma, paja dulce

Hierba anual. **Tallos** erectos de 10 a 130 cm altos, glabros. **Hojas** de vaina rojiza, redondeada, pubescente, con presencia de un anillo de color púrpura externamente en la base de la vaina, con lígula de 1.5 a 2.5 mm larga, ciliada; lámina de 8 a 23 cm larga x 5 a 11 mm ancha, con margen escabrosa. **Inflorescencia** en panícula de racimos, abierta, hasta 50 cm larga, blancuzca; racimos de 5 a 10 cm largos, numerosos,

patentes. ***Espiguillas*** de 1.8 a 3 mm largas, dispuestas en 2 hileras, comprimidas lateralmente, con desarticulación arriba de las glumas y entre los flósculos; raquis triqueto; glumas de 1.5 a 2.5 mm largas, desiguales, 1-nervadas; de 3 a 4 flósculos, fértiles; lemma inferior de 1.1 a 1.6 mm larga; 3 anteras en el flósculo inferior, *ca.* 0.4 mm largas, ápice dividido; 2 estigmas plumosos. **Fruto** en cariópside, sulcado, ventralmente comprimido, globoso por el dorso.

20. ***Oryza sativa* L.**

NV: arroz rojo

La siguiente descripción del arroz rojo es la más general; hay muchas formas de arroz rojo.

Hierba anual. **Tallos** de 40 a 150 cm altos, glabros, fistulosos. **Hojas** con vaina glabra, auriculadas; lígula de 1 a 3 cm larga, membranosas, deltoide-lanceoladas, glabras; aurícula ciliada, hasta 7 mm de long.; lámina de 27 a 60 cm larga x 1 a 2 cm ancha, margen y haz escabrosos. **Inflorescencia** en panícula terminal, de 20 a 35 cm larga, laxamente contraída; ramas inferiores hasta 13 cm largas. ***Espiguillas*** fuertemente comprimidas lateralmente, con 3 flósculos que se desarticulan de una cúpula como una unidad, de 7 a 12 mm largos x 1.6 a 2.5 mm anchos, oblongos; glumas reducidas a crestas diminutas o a cúpula en la parte del pedicelo; flósculos inferiores estériles, cada uno reducido a una lemma subulada, 1-nervada; flósculo terminal bisexual; lemmas estériles de 2 a 4 mm largas, 1-nervadas; lemma fértil de 7 a 12 mm larga, escabrosa sobre las nervaduras y entre ellas, sin arista o con una hasta de 7 cm larga, 5-nervada, navicular, coriácea; pálea 3-nervada, oblonga; 2 lodículas; 2 estilos; 3 ó 6 estambres. **Fruto** en cariópside.

21. ***Rottboellia cochinchinensis* (Lour.) W. Clayton**
sin. *Rottboellia exaltata* L. f., *Stegosia cochinchinensis* Lour.

NV: caminadora, pela bolsillo

Hierba anual, cespitosa, generalmente con raíces fúlcreas. **Tallos** de 50 a 200 cm altos, sólidos, ramificados; entrenudos y nudos glabros. **Hojas** con vainas que tienen pelos hirsutos sentados en una base abultada; lígula como membrana ciliada de *ca.* 1.4 mm larga y lámina de 15 a 45 cm larga x 1 a 1.5 cm ancha; lineales anchas, fuertemente híspido-escabrosas por el haz y en la margen. **Inflorescencias** en racimo solitario, cilíndrico, con espiguillas hundidas en el raquis grueso y fistuloso; racimos de 5 a 12 cm largos, terminal y axilares, atenuados, el extremo terminal con espiguillas reducidas o rudimentarias; el raquis es articulado, con entrenudos de 3.5 a 7 mm largos, adnado a la margen del pedicelo adyacente. ***Espiguillas pareadas***, comprimidas dorsalmente, 2 espiguillas y 1 entrenudo del raquis caedizos como una unidad; espiguilla sésil de 4 a 5.5 mm larga, bisexual; gluma inferior tan larga como la espiguilla, coriácea, con oxalato de calcio en la cara exterior que produce textura rugosa; gluma superior navicular, tan larga como la espiguilla, cartácea, blanquecina; 2 flósculos sésiles, insertos en el mismo plano, uno con lemma y pálea hialinas, membranosas, unisexual o bisexual, el otro con lemma y pálea cartáceas, generalmente bisexual; 3 anteras, *ca.* 2 mm largas; 2 estigmas plumosos; 2 lodículas. ***Espiguilla pedicelada*** de 4 a 5.5 mm larga, verde; gluma inferior tan larga como la espiguilla; gluma superior ligeramente más pequeña que la inferior; un flósculo estaminado. **Fruto** en cariópside.

Pontederiaceae

22. ***Heteranthera limosa* (Sw.) Willd.**
sin. *Pontederia limosa* Sw., *Schollera limosa* (Sw.) Raf., *Leptanthus ovalis* Michx., *Heteranthera alismoides* Humb. ex Link, *Lunania uniflora* Raf., *Triexastima uniflora* (Raf.) Raf., *Pontederia triandra* Banks ex Mart., *Heteranthera limosa* f. *albiflora* Benke

NV: codillo, consuelda, buche de gallina

Hierbas de palustre a acuática, emergente, perenne. **Rizoma** corto, suberecto, del que se desprenden las raicillas. **Hojas** suculentas, color verde brillante, dispuestas en roseta basal; limbo ovado a ovado-lanceolado, de 1 a 5 cm largo x 0.5 a 2.5 cm ancho, ápice redondeado u obtuso, margen entera, base levemente inequilátera, truncada, subredondeada o subcordada, venación paralelinervia; lámina glabra; pecíolos glabros, suculentos, los de hojas centrales erguidos y los periféricos postrados sobre el sustrato; de 2 a 20 cm largos, envainados por una estipula escotada de 1 a 6 cm larga, ápice mucronado, púrpura al secado. **Flor** única, subtendida por una espata foliosa, plegada, que encubre el ovario, de 1 a 4 cm larga, pedúnculo de 2 a 7 cm largo, basalmente subtendido por una vaina espatosa, plegada, con un conspicuo entrenudo entre las dos espatas. Perianto petaloide, de color azul, salviforme, 6-lobulado, el tubo de 2 a 4 cm largo, lóbulos oblongos de ápice obtuso, de 1 a 2 cm largos x 0.3 a 0.4 cm anchos. Androceo de 3 estambres, uno central más desarrollado de color azul, exertos, adnados al tubo de la corola; filamentos lineales a lo largo del tubo, planos sobre el mismo; 2 anteras, oblongas, de 3 a 4 mm largas, una antera mayor (4 ó 5 mm larga), sagitada. Ovario súpero, 3-locular, multiseriado, de 1 a 1.5 mm largo, oblongo, estilo púrpura, glabro, plano, estigma dorsalmente curvo, de 2 a 3 mm largo. **Fruto** en cápsula, oblongo-elipsoide, de 1.5 a 2 cm largo. **Semillas** numerosas, de 0.6 a 0.8 mm largas, oblongo-elipsoides, con *ca.* 10 costillas longitudinales.

Portulacaceae

23. ***Portulaca oleracea* L.**
sin. *Portulaca consanguinea* Schltdl., *Portulaca intermedia* Link ex Schltdl., *Portulaca marginata* Kunth, *Portulaca neglecta* Mack. & Bus, *Portulaca pusilla* Kunth, *Portulaca retusa* Engelm.

NV: verdolaga cimarroncita, verdolaga, verdolaga grande, nucrerejo, verdolaga negra, verdolaga colorada.

Hierba postrada, anual, probablemente también perenne. **Tallos** de postrados a erguidos, suculentos, glabros. **Hojas** suculentas, simples, alternas, a veces se presentan opuestas y subopuestas, color verde brillante pero oscuras al secado, limbo oblongo-obovado a subespatulado, de 5 a 25 mm largo x 4 a 12 mm ancho, cubierto por diminutas papilas blancuzcas al secado, de ápice truncado, redondeado, raras veces emarginado, borde entero, base cuneada; pecíolos inconspicuos, < 2 mm largos, semi-envainadores, ligeramente alados, pilosos axialmente, con tricomas *ca.* 1 mm largos; estípulas membranáceas, ampliamente deltoides, 3 mm largas x 2 mm anchas. **Flores** (de 1 a 10) agrupadas en dicotomía de las ramas, subtendidas por hojas verticiladas, sésiles; brácteas ovadas, *ca.* 3 mm largas, acuminadas, hialinas; cáliz de 2 sépalos, ovados a orbiculares, glabros, *ca.* 5 mm largos, carinados, dorsalmente unidos en la base; corola de 5 pétalos,

generalmente ovados, de 4 a 6 mm largos, de color amarillo; 6 a 12 estambres, filamentos de < 1.2 mm largos; anteras oblongas, *ca.* 0.5 mm largas, bitecales, con dehiscencia longitudinal; ovario semi-ínfero, de 2.5 a 3 mm largo, ovoide, apicalmente acuminado-piramidal, cubierto por un receptáculo carnoso; 4 a 6 estigmas peniciliformes. **Fruto** en cápsula, *ca.* 6 mm largo, encerrado por los sépalos; dehiscencia circuncísil. **Semillas** numerosas, semicircinadas, hasta 1 mm largas, negras, brillantes, testa diminutamente tuberculada (> 20x).

Rubiaceae

24. ***Richardia scabra* L.**
sin. *Richardia pilosa* Ruiz & Pav., *Richardia procumbens* Sessé & Moc., *Richardia pilosa* (Ruiz & Pav.) Kunth, *Richardsonia scabra* (L.) A. St.-Hil.

NV: ipecacuana, botoncillo, tapó, tabaquillo.

Hierba semipostrada o erecta, perenne o anual, *ca.* 0.5 m alta, que crece a menudo en colonias. **Tallos** teretes, foliosos, de 1 a 4 mm gruesos; pubescentes, con tricomas simples, hasta 2 mm largos, blancuzcos al secado, persistentes; estípulas interpeciolares que forman una vaina, de 2 a 4 mm largas, con 3 a 7 rayos, *ca.* 1.5 mm largos, difíciles de observar entre los pelos más grandes de los nudos. **Hojas** simples, opuestas, pilosas; pecíolos de 3 a 12 mm largos, pobremente diferenciados de la lámina foliar; limbo oblongo-elíptico a oblanceolado-elíptico, de 1 a 6 cm largo x 0.5 a 2.5 cm ancho, ápice de agudo a obtuso, base atenuada, decurrente al pecíolo, margen entera; 3 a 6 pares de venas secundarias, fuertemente ascendentes. **Inflorescencia** terminal, capitada, sésil, de 5 a 20 mm larga, subtendida por involucro de 2 a 4 brácteas foliosas, decusadas, de 1 a 2 cm largas, de venación palmeada. **Flores** cercanamente agrupadas, pedicelo corto o ausente de < 1 mm largo; hermafroditas, monomórficas, radialmente simétricas; hipanto hasta 2 mm largo; cáliz de 6 sépalos, tubo *ca.* 0.5 mm largo, lóbulos *ca.* 3 mm largos x 1 mm anchos, ciliados marginalmente; corola salviforme, de color blanco, tubo hasta 7 mm largo, lóbulos deltoides, *ca.* 3 mm largos; androceo con (5) 6 estambres, exertos o insertos, anteras *ca.* 1 mm largas, filamentos de 7 a 9 mm largos; ovario ínfero, estilo *ca.* 8 mm largo, estigma bífido, *ca.* 1 mm largo. **Fruto** consta de 3 mericarpos, oblongos a ovoides, la cara interna con un angosto y longitudinal sulco, papilados sobre la superficie abaxial y las papilas más grandes distalmente. **Semillas** de 2 a 3 mm largas x 1.2 a 1.5 mm anchas, de color marrón.

N. del E.: 'con (5) 6' indica que algunas veces hay 5 estambres, pero generalmente habrá 6.

Solanaceae

25. ***Physalis angulata* L.**
sin. *Physalis capsicifolia* Dunal, *Physalis esquirolii* H. Lévi & Vaniot, *Physalis lanceifolia* Nees, *Physalis linkiana* Nees, *Physalis ramosissima* Mill.

NV: vejigón, bolsa mullaca, huilla, mullaca, toporotopo, uva

Hierba erecta o decumbente, hasta 1 m alta. **Tallos** angulosos, glabros excepto por pequeños pelos adpresos en partes jóvenes. **Hojas** hasta 10 cm largas, ovadas o elípticas, ápice agudo o acuminado, base cuneada, obtusa, algunas veces inequilátera, con margen entera, sinuada, dentada o con incisiones irregulares, esencialmente glabras o con

pelos esparcidos en las venas; pecíolos de $^1/_2$ a $^1/_3$ el largo de las hojas; pedicelos de 5 a 13 mm largos, delgados, normalmente glabros. **Flores** solitarias, axilares; cáliz de 3 a 5 mm largo x 2 a 4 mm diámetro en la base de los 5 lóbulos, éstos con ápice agudo, puberulentos y cortamente ciliados; corola de 4 a 10 mm larga, amarillenta, 5-lobulada, sin contracción evidente en garganta; 5 estambres, con filamentos aplanados, anteras de 1.8 a 2.5 mm largas, amarillo-azulinas; ovario súpero, oblongo-elíptico, con estilo filiforme, más largo que estambres. **Fruto** en baya globosa, de 10 a 12 mm diámetro, multiseminada, envuelta por el cáliz globoso; cáliz de 2 a 3 cm largo en fruto, apicalmente contraído, basalmente invaginado y completamente glabro; pedicelo delgado igual de largo al cáliz desarrollado o la mitad de él. **Semillas** *ca.* 1.5 mm diámetro, aplanadas, lenticulares y finamente rugosas.

Distribución geográfica

La distribución en Mesoamérica, América del Sur y el Caribe de las especies a las que corresponden las descripciones anteriores aparece en el Cuadro 1. Proviene de la base de datos del Missouri Botanical Garden, cuya dirección en Internet es: http://mobot.mobot.org/W3T/Search/vast.html

Cuadro 1. Distribución geográfica de 25 especies de malezas que son frecuentes en los cultivos de arroz en Mesoamérica, en América del Sur y en el Caribe.

Especie	En Mesoamérica	En América del Sur	En el Caribe
1. *Amaranthus dubius*	México, Belice, Costa Rica, Nicaragua, Panamá	Bolivia, Colombia, Ecuador, Perú, Venezuela	Bahamas, Cuba, Rep. Dominicana, Jamaica, Puerto Rico, Trinidad y Tobago, Islas Vírgenes, Granada
2. *Eclipta alba*	Costa Rica, El Salvador, Honduras, México, Panamá	Argentina, Bolivia, Brasil, Colombia, Ecuador, Perú, Venezuela	Antigua, Bahamas, Bermudas, Cuba, Rep. Dominicana, Jamaica, Puerto Rico, Trinidad y Tobago, Islas Vírgenes
3. *Senna obtusifolia*	Belice, Costa Rica, El Salvador, Guatemala, Honduras, México, Panamá	Argentina, Bolivia, Colombia, Ecuador, Paraguay, Perú, Venezuela	Cuba, Rep. Dominicana, Haití, Jamaica, Puerto Rico, Trinidad y Tobago, Islas Vírgenes, Dominica
4. *Commelina erecta*	Belice, Costa Rica, El Salvador, Guatemala, Honduras, México, Nicaragua, Panamá	Argentina, Bolivia, Colombia, Ecuador, Paraguay, Perú, Uruguay, Venezuela	Cuba, Rep. Dominicana, Haití, Jamaica, Islas Vírgenes, Martinica

(Continúa)

Cuadro 1. (Continuación.)

Especie	En Mesoamérica	En América del Sur	En el Caribe
5. *Murdannia nudiflora*	Costa Rica, El Salvador, México, Nicaragua, Panamá	Colombia, Venezuela	Puerto Rico
6. *Cyperus esculentus*	Costa Rica, El Salvador, Honduras, México, Nicaragua, Panamá	Argentina, Bolivia, Colombia, Ecuador, Paraguay, Perú, Venezuela	Cuba, Jamaica, Guadalupe, Puerto Rico, Trinidad, Martinica
7. *Cyperus iria*	Costa Rica, El Salvador, Honduras, México, Nicaragua, Panamá	Argentina, Bolivia, Brasil, Ecuador, Perú, Venezuela	Cuba, Rep. Dominicana, Puerto Rico
8. *Cyperus rotundus*	Belice, Costa Rica, El Salvador, Guatemala, Honduras, México, Nicaragua, Panamá	Argentina, Bolivia, Brasil, Colombia, Chile, Ecuador, Paraguay, Perú, Uruguay, Venezuela	Bahamas, Bermudas, Cuba, Rep. Dominicana, Jamaica, Dominica, Puerto Rico, Trinidad y Tobago, Islas Vírgenes, Martinica
9. *Fimbristylis miliacea*	Costa Rica	Ecuador, Colombia, Perú, Venezuela	Puerto Rico
10. *Caperonia palustris*	Belice, Costa Rica, El Salvador, Guatemala, Honduras, México, Nicaragua, Panamá	Argentina, Bolivia, Colombia, Ecuador, Paraguay, Perú, Venezuela	Cuba, Rep. Dominicana, Guadalupe, Martinica, Puerto Rico, Trinidad
11. *Macroptilium lathyroides*	Belice, Costa Rica, México, Nicaragua, Panamá	Argentina, Bolivia, Colombia, Ecuador, Paraguay, Perú, Uruguay, Venezuela	Bahamas, Islas Caimán, Cuba, Rep. Dominicana, Haití, Jamaica, Dominica, Curazao, Puerto Rico, Trinidad y Tobago, Islas Vírgenes, Martinica
12. *Limnocharis flava*	Costa Rica, México, Nicaragua, Panamá	Argentina, Bolivia, Colombia, Ecuador, Paraguay, Perú, Venezuela	Rep. Dominicana
13. *Ludwigia decurrens*	Costa Rica, Guatemala, Honduras, México, Nicaragua, Panamá	Argentina, Bolivia, Brasil, Colombia, Ecuador, Paraguay, Perú, Venezuela	Bermudas, Puerto Rico, Trinidad

(Continúa)

Cuadro 1. (Continuación.)

Especie	En Mesoamérica	En América del Sur	En el Caribe
14. *Ludwigia erecta*	Belice, Costa Rica, El Salvador, Guatemala, Honduras, México, Nicaragua, Panamá	Argentina, Bolivia, Brasil, Colombia, Ecuador, Guyana, Paraguay, Perú, Surinam, Venezuela	Bahamas, Islas Caimán, Cuba, Rep. Dominicana, Haití, Jamaica, Antigua, Guadalupe, Puerto Rico, Trinidad y Tobago
15. *Digitaria bicornis*	Belice, Costa Rica, El Salvador, Guatemala, Honduras, México, Nicaragua, Panamá	Argentina, Bolivia, Brasil, Colombia, Ecuador, Paraguay, Perú, Venezuela	Bahamas, Cuba, Rep. Dominicana, Haití, Jamaica, St. Kitts y Nevis, Puerto Rico, Trinidad y Tobago
16. *Echinochloa colona*	Belice, Costa Rica, El Salvador, Guatemala, Honduras, México, Nicaragua, Panamá	Argentina, Bolivia, Brasil, Chile, Colombia, Ecuador, Paraguay, Perú, Uruguay, Venezuela	Bahamas, Cuba, Rep. Dominicana, Haití, Jamaica, Dominica, Guadalupe, St.Kitts y Nevis, Puerto Rico, Trinidad y Tobago, Islas Vírgenes
17. *Eleusine indica*	Belice, Costa Rica, El Salvador, Honduras, Guatemala, México, Nicaragua, Panamá	Argentina, Bolivia, Brasil, Colombia, Ecuador, Guyana, Paraguay, Perú, Surinam, Venezuela	Bahamas, Bermudas, Cuba, Rep. Dominicana, Haití, Jamaica, Dominica, Guadalupe, St. Kitts y Nevis, Puerto Rico, Trinidad y Tobago, Islas Vírgenes, Martinica, Santa Lucía
18. *Ischaemum rugosum*	Costa Rica, Honduras, Nicaragua, Panamá	Brasil, Colombia, Ecuador, Guayana Francesa, Perú, Surinam, Venezuela	Cuba, Rep. Dominicana, Jamaica, Trinidad y Tobago
19. *Leptochloa mucronata*	El Salvador, Honduras, Guatemala, México	Argentina, Bolivia, Colombia, Ecuador, Perú, Venezuela	Montserrat
20. *Oryza sativa*	Belice, Costa Rica, El Salvador, Honduras, Guatemala, México, Nicaragua, Panamá	Bolivia, Brasil, Chile, Colombia, Ecuador, Perú, Venezuela	Rep. Dominicana, Jamaica, Trinidad

(Continúa)

Cuadro 1. (Continuación.)

Especie	En Mesoamérica	En América del Sur	En el Caribe
21. *Rottboellia cochinchinensis*	Belice, Costa Rica, El Salvador, Honduras, Guatemala, México, Nicaragua, Panamá	Argentina, Brasil, Bolivia, Colombia, Ecuador, Guayana Francesa, Perú, Venezuela	Bahamas, Cuba, Rep. Dominicana, Jamaica, St. Kitts y Nevis, Trinidad y Tobago, Puerto Rico
22. *Heteranthera limosa*	Costa Rica, El Salvador, Honduras, Guatemala, México, Nicaragua, Panamá	Argentina, Bolivia, Colombia, Ecuador, Paraguay, Venezuela	Cuba, Rep. Dominicana, Jamaica
23. *Portulaca oleracea*	Belice, Costa Rica, El Salvador, Honduras, Guatemala, México, Nicaragua, Panamá	Argentina, Brasil, Bolivia, Colombia, Chile, Ecuador, Guyana, Guayana Francesa, Paraguay, Perú, Surinam, Venezuela	Bahamas, Islas Caimán, Rep. Dominicana, Jamaica, Haití, Dominica, Puerto Rico, Trinidad y Tobago, Islas Vírgenes
24. *Richardia scabra*	Belice, Costa Rica, El Salvador, Honduras, Guatemala, México, Nicaragua, Panamá	Brasil, Bolivia, Colombia, Ecuador, Paraguay, Perú	Cuba, Jamaica, Puerto Rico
25. *Physalis angulata*	Belice, Costa Rica, El Salvador, Honduras, Guatemala, México, Nicaragua, Panamá	Argentina, Brasil, Bolivia, Colombia, Ecuador, Paraguay, Perú, Surinam	Bahamas, Cuba, Rep. Dominicana, Haití, Jamaica, Antigua, Dominica, Puerto Rico, Trinidad y Tobago, Islas Vírgenes, Martinica

Referencias bibliográficas

Agostini, G. 1974. El género *Heteranthera* (Pontederiaceae) en Venezuela. Separata. Acta Botánica Venezuelica 9(1-4):295-301.

Agudelo, C.A. 1994. Revisión taxonómica de *Amaranthaceae* en Colombia. Tesis (Maestría). Instituto de Ciencias Naturales, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia.

Alvarez, J.L. 2004. Reconocimiento y algunos aspectos de la biología de especies del género *Digitaria* asociadas al agroecosistema arrocero en los departamentos de Tolima y Huila, Colombia. Tesis (Ing. Agrón.). Univesidad del Tolima, Facultad de Agronomía, Ibagué, Colombia.

Aranda, P.A.; Manrique, E. 1990. Glosario de términos agrostológicos. Universidad Nacional Autónoma de México, México, DF. 37 p.

Austin, D.F. 1982. Convolvulaceae. In: Harling, G.; Sparre, B. (eds.). Flora de Ecuador. Quito, Ecuador. vol. 15, p. 3-98.

Austin, D.F. 1982. Convolvulaceae. In: Luces de Febres, Z.; Steyermark, J.A. (eds.). Flora de Venezuela. Instituto Botánico, Dirección de Recursos Naturales Renovables, Caracas, Venezuela. vol. 8, no. 3.

Cárdenas, J.; Reyes, C.E.; Doll, J. 1972. Malezas tropicales/Tropical Weeds. Instituto Colombiano Agropecuario e International Plant Protection Center, Bogotá, Colombia. 341 p.

Cardiel, J.M.; Estrada, J.; Fuentes, J.; González, F. 1991. Bibliografía botánica para Colombia 1. In: Estrada, J.; Fuentes, J.; Cardiel, J.M. Agencia Española de Cooperación Internacional, Editora Guadalupe, Bogotá, Colombia. 400 p.

Castellanos, A. 1952. Revisión de las Pontederiaceae argentinas. De Lilloa XXV, Tucumán, Argentina. p. 585-594.

Castellanos, A. [s.f.]. Las Pontederiaceae de Brasil. Separata. Arquivos do Jardim Botánico. vol. 16.

CIBA-GEIGY. 1982. Monocot weeds 3. Basilea, Suiza. 335 p.

D'arcy, W.G. 1973. Family 170: Solanaceae. In: Woodson, R.E. Jr.; Schery, R.W. et al. (eds.). Flora of Panama. Annual Missouri Botanical Garden, St. Louis, MO, EE.UU., vol. 60, no. 3, p. 573-760.

D'arcy, W.G. 1975. Compositae: Introduction. In: Woodson, R.E. Jr.; Schery, R.W. (eds.). Flora of Panamá. Annual Missouri Botanical Garden, St. Louis, MO, EE.UU., vol. 62, no. 4, p. 835-856.

Davidse, G.; Pohl, R.W. 1994. Poaceae. In: Davidse, G.; Sousa, S.; Chate, O. (eds.). Flora Mesoamericana. Annual Missouri Botanical Garden, vol. 6, p. 184-402.

Doll, J.; Argel, P.; Gómez, C. 1989. Principios básicos para el manejo y control de malezas en las praderas. Guía de estudio. Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), Cali, Colombia. 59 p.

Dwyer, J.D. et al. 1980. Leguminosae. In: Flora de Panamá. Annals of the Missouri Botanical Garden, St. Louis, MO, EE.UU. 67 p.

Font Quer, P. 1977. Diccionario de Botánica. Labor, Buenos Aires. 1244 p.

Fuentes, C.L.; Almario, O.; Cifuentes, F. 1999. Malezas ciperáceas asociadas con el cultivo del arroz en Colombia. AgrEvo, Bogotá, Colombia. 198 p.

Fuentes, C.L.; Granados, J.C.; Osorio, O.; Piedrahita, W. 2006. Flora arvense asociada con el cultivo del arroz en el Departamento del Tolima, Colombia. Facultad de Agronomía de la Universidad Nacional de Colombia y Bayer Crop Science, Bogotá, Colombia. 294 p.

González, G.; Webb, M. 1989. Manual para la identificación y el control de malezas. Centro de Investigación Agrícola Tropical (CIAT), Santa Cruz, Bolivia.

Haynes, R.R.; Holm-Nielsen, L.B. 1992. The Limnocharitaceae. Flora Neotropica 56:1-34.

Holm, L.; Plucknett, D.; Pancho, J.; Herberger, J. 1977. The world's worst weeds: Distribution and biology. The University of Hawaii Press, Honolulu, HI, EE.UU. 609 p.

Holm, L.; Doll, J.; Holm, E.; Pancho, J.; Herberger, J. 1997. World weeds: Natural histories and distribution. John Wiley & Sons, Nueva York. 1129 p.

Horn, C. 1987. Pontederiaceae. In: Harling, G.; Sparre, B. (eds.). Flora de Ecuador. Quito, Ecuador. vol. 29, p. 3-19.

Kissmann, K.G. 1991. Plantas infestantes e nocivas. Tomo 1. BASF Brasileira, São Paulo, Brasil.

Kissmann, K.G.; Groth, D. 1995. Plantas infestantes e nocivas. Tomos II y III. BASF Brasileira, São Paulo, Brasil.

López-J., G. 1977. Nombres científicos y vulgares de las plantas más comunes. Serie Manuales: Temas de orientación agropecuaria (Bogotá) 126:1-136.

Lorence, D.H. 1999. A nomenclator of Mexican and Central American Rubiaceae. Monographs in systematic botany. Missouri Botanical Garden Collection, St. Louis, MO, EE.UU. vol. 73, p. 1-177.

Macbride, J.F. 1937. Amaranthaceae. In: Macbride, J.F. (ed.). Flora of Peru. Field Museum of Natural History and Botany Series 13(2):445-555.

Macbride, J.F. 1943. Leguminosae. In: Macbride, J.F. (ed.). Flora of Peru. Field Museum of Natural History and Botany Series 13(1):3-507.

Macbride, J.F. 1951. Euphorbiaceae. In: Macbride, J.F. (ed.). Flora of Peru. Field Museum of Natural History and Botany Series 13(3A-1):3-200.

McDonald, A. 1993. Flora de Veracruz no. 73: Convolvulaceae I. Instituto de Ecología A. C. Xalapa. Veracruz, México. 99 p.

McDonald, A. 1994. Flora de Veracruz no. 77: Convolvulaceae II. Instituto de Ecología A. C. Xalapa. Veracruz, México. 133 p.

Munz, P.A. 1974. Onagraceae. In: Harling, G.; Sparre, B. (eds.). Flora de Ecuador. Opera Botanica, Serie B 3:3-46.

Puentes, B.; Fuentes, C.L. 2003. Reconocimiento de la flora arvense asociada al cultivo del arroz (*Oryza sativa* L.) en el Departamento del Tolima. In: Memorias del XXXIII Congreso de la Sociedad Colombiana de Control de Malezas y Fisiología Vegetal (COMALFI) reunido en Montería, Córdoba. Montería, Colombia. p. 99.

Püntener, W. (ed.). 1988. Dicot Weeds 1. CIBA-GEIGY, Basilea, Suiza. 335 p.

Reyes, C.; Cárdenas, J. (s.f.). Catálogo de malezas del Tolima Sur. Publicación 001. Instituto Colombiano Agropecuario (ICA), Bogotá, Colombia. 66 p.

Sen, D.N. 1981. Ecological approach to Indian weeds. Geobios International, Jodhpur, India. 301 p.

Taylor, M. 1993. Rubiaceae. In: Burger, W. (ed.). Flora Costarricencis. In: Fieldiana: Botany. San José, Costa Rica. vol. 33, p. 1-333.

Glosario

Acuminado	Terminado en punta o acumen.
Adnado	Órgano unido a órganos diferentes a él.
Adpreso	Órganos, especialmente foliáceos, aproximados al eje en que se insertan, sin soldarse.
Alado	Cualquier órgano que esté bordeado por una dilatación laminar, foliácea o membranosa (tallos alados, pecíolo alado).
Apétala	Planta o flor desprovista de pétalos.
Apiculado	Provisto de apículo o puntita (hoja apiculada).
Arvense	Planta adventicia; maleza; planta que crece siempre, o en forma predominante, asociada con un sistema agrícola.
Axila	Ángulo formado por el tallo y la hoja en su inserción; en las plantas con flores se desarrollan yemas en las axilas de las hojas.
Basifijo	Adherido (fijo) por su base; se dice especialmente de las anteras respecto a su manera de insertarse en el filamento estaminal.
Braquidódroma	Tipo de venación o nerviación en que los nervios foliares secundarios, antes de llegar al borde de la hoja, se arquean y se enlazan o unen entre sí.
Cabezuela	Capítulo; se aplica también a la inflorescencia de las ciperáceas y a la agrupación de espiguillas en forma de capítulos.
Campanulada	Semejante a una campana (generalmente la corola).
Capitado	Órgano en forma de cabeza (estigma capitado); órgano dispuesto en capítulo.
Carina	Quilla
Carinado	Órgano provisto de una línea en resalto, a modo de quilla.
Cartáceo(a)	De consistencia apergaminada.
Catafilos	Hojas inferiores situadas entre los cotiledones y los eófilos, en la sucesión foliar.
Ciliado	Órgano u organismo provisto de cilios o pelos muy finos, sobre todo en su borde; en las plantas se aplica principalmente a los órganos laminares cuyos bordes están recubiertos de pelos.
Circuncísil	Fruto en cápsula con dehiscencia circular.
Concrescente	Órgano o parte de un órgano que está congénitamente unido, como los pétalos de una corola gamopétala.
Copuliforme	En forma de copa.
Cordiforme	Órgano laminar con figura de corazón en que la parte más ancha es la base; cuando esa parte está en el ápice, el órgano se llama obcordiforme.
Coroniforme	En forma de corona.

Crenado	Festoneado, con muescas o festones.
Cuneado	En forma de cuña (también cuneiforme); lámina angostada en la base.
Decumbente	Tallo no erguido o con tendencia a echarse sobre el suelo.
Decurrente	En las hojas, lámina que se prolonga inferiormente por debajo del punto de inserción en el tallo; en general, órgano que se prolonga sobre otro órgano más allá de su inserción.
Deltoide	Órgano laminar cuyo contorno semeja un delta o un triángulo isósceles, de base poco ancha (también, deltoideo).
Denticulado	Órgano generalmente foliáceo que tiene bordes con dientes muy menudos.
Discorde	Inarmónico, muy diferente o muy opuesto (por ejemplo, colores discordes).
Divaricado	Rama, ramita o, en general, eje secundario o eje de una estructura que forma un ángulo amplio con el eje principal.
Emarginado	Órgano foliáceo con muesca o entalladura poco profunda en su ápice.
Enervio(a)	Hoja u otro órgano en que no se aprecian nervios o nervaduras a simple vista.
Escaberuloso	Apenas escabroso.
Escabroso	Lleno de asperezas y áspero al tacto; superficie provista de tricomas cortos y rígidos que se aprecian bien al tacto.
Escarioso	Órgano de naturaleza foliar y consistencia membranosa, más o menos endurecido y seco y generalmente translúcido (por ejemplo, los catáfilos de ajos y cebollas).
Espiciforme	Inflorescencia que tiene aspecto de espiga, aunque no lo es.
Estrigoso	Tallo, hoja u otro órgano cubierto de pelos rígidos o de notables asperezas; áspero al tacto.
Filiforme	Con forma de hebra, delgado; si el órgano es todavía más fino, se llama *capilar*, y si no lo es tanto, *linear*.
Fistuloso	Tallo, especialmente, o pedículo u órgano similar hueco en su interior y tubuloso (como muchas gramíneas); que tiene muchas fístulas.
Flósculo	Flor de una inflorescencia.
Folioso(a)	Provisto de hojas; que tiene forma y textura como las de una hoja.
Fruticoso(a)	Planta arbustiva; planta con tallos leñosos en la base.
Fúlcreo	Que sirve de apoyo o sostén (como las raíces fúlcreas).
Glabrescente	Casi sin vello.
Glabro	Desprovisto totalmente de pelos o vellos; liso.

Gluma	Hipsófilo o bráctea que, en las ciperáceas, envuelve la flor; en las gramíneas, bráctea que rodea la flor.
Hipanto	Tálamo ahondado de una flor de ovario ínfero; parte axial de una flor soldada a su propio ovario.
Híspido	Órgano vegetal cubierto de pelos muy rígidos y muy ásperos al tacto, casi punzantes.
Invaginado	Doblado hacia adentro por los bordes.
Involuto(a)	En la vernación, hoja que se encorva por sus bordes hacia su haz o cara interna, enrollándose; se dice también del órgano foliáceo cuyos bordes están más o menos encorvados sobre la haz.
Lenticular	En forma de lenteja.
Membranáceo	Delgado y semi-transparente, parecido a una membrana.
Mucrón	Apículo o puntica.
Mucronado	Cualquier órgano que remata de manera abrupta o súbita en una punta corta y aguda, más o menos aislada (también, mucronato).
Muricado(a)	Superficie con espinas, pinchos o aguijones.
Navicular	Órgano vegetal parecido a una barquita o navícula.
Obtuso	Órgano laminar cuyos bordes forman, en el ápice, un ángulo agudo; órgano cuyo ápice o extremo superior es redondeado, romo y no acaba en punta.
Ovado	Órgano con forma de huevo en que la parte más ancha corresponde a la inferior del órgano; si el órgano es macizo y no laminar, se emplea mejor el término *ovoide.*
Paludoso(a)	Propio de terrenos bajos e inundados o de pantanos (planta paludosa; también, paludícola, palustre).
Papila	El tricoma más simple, reducido a una excrecencia de la membrana de una célula epidérmica; producción superficial diversa, granulosa y más o menos translúcida.
Papiloso	Que tiene papilas.
Patente	Hoja, rama u otra parte de la planta que forma un ángulo muy abierto con el tallo en que se inserta (puede llegar a 90°).
Pubérulo(a)	Ligeramente pubescente, o con pelitos muy finos, cortos y escasos (también, puberuloso(a)).
Pubescente	Cubierto de vello fino y suave.
Quilla	Conjunto de los pétalos inferiores o delanteros de las papilionáceas; línea o nervio en resalto (también, carina).
Rafe	Engrosamiento alargado de tejido con que el funículo del óvulo (su conexión a la placenta) se suelda a un tegumento del óvulo.
Retuso	Órgano laminar de ápice truncado y ligeramente escotado.

Sagitado(a)	Con figura de saeta o flecha; generalmente, hoja en que la zona apical es alargada y puntiaguda, y la base tiene dos lóbulos más o menos divergentes.
Salviforme	Corola, cáliz u otra parte de la planta de forma bilabiada semejante a la corola de las labiadas (también, labiatiforme).
Sésil	Órgano laminar que carece de pie o apoyo similar al pedúnculo o al pedicelo.
Setáceo	Fino como una seta, que es un pelo endurecido y no muy corto.
Sigmoideo	Parte de la planta curvada dos veces sobre sí misma; parecido a una *S* (también, sigmoide).
Subular	Que se estrecha hacia el ápice hasta rematar en punta fina.
Sulcado	Surcado, con surcos (epidermis sulcada).
Terete	Circular en su sección transversal, redondo, cilíndrico (tallo u hoja terete).
Tuberculado(a)	Superficie provista de pequeñas prominencias o abultamientos.
Unguiculado	Provisto de una uña, como los pétalos de cariofiláceas (pétalos unguiculados).
Velutino	De superficie finamente aterciopelada (también, velutinoso).
Ventrifijo	Unido a un soporte por su cara ventral (antera ventrifija); se opone a *dorsifijo*.
Verticilado	Hojas, ramitas, flores, etc., dispuestos en verticilos (*ver éste*).
Verticilo	Conjunto de tres o más hojas que nacen a un mismo nivel en el tallo; se aplica también a las flores (verticilo(s) del cáliz, verticilo(s) de la corola).
Vírgula	Entidad en forma de bastoncito (o parecida).

Capítulo 21

Manejo de las malezas del arroz en América Latina: Problemas y soluciones

Cilia L. Fuentes

Contenido

	Página
Resumen	391
Abstract	391
Introducción	392
Manejo de las malezas	394
Manejo bajo un marco de sostenibilidad	394
Manejo integrado de malezas	395
Elementos básicos del manejo	396
Control temprano de las malezas en arroz	397
Selección de herbicidas para el manejo de malezas	402
Características del herbicida	402
Parámetros que definen el herbicida	404
Prevención y manejo de la resistencia a los herbicidas	405
Control deficiente	408
Estrategias para reducir el riesgo de aparición de la resistencia	408
Estrategias para manejar las malezas resistentes	409
Referencias bibliográficas	411

Resumen

Se proponen pautas para manejar las malezas del arroz en América Latina dentro de un marco de sostenibilidad y según los principios del manejo integrado de malezas. En él se resaltan dos puntos: el mejor uso que se debe dar a los herbicidas y la forma de evitar que algunas malezas presenten problemas de resistencia a los compuestos químicos contenidos en los herbicidas. También se describen los principales factores que inciden en el incremento de los costos del control de malezas, y se presenta un listado de los principales herbicidas usados actualmente en el cultivo del arroz, con recomendaciones específicas para la selección de éstos según sus características.

Abstract

Weed management in rice crops in Latin America: Problems and solutions
Guidelines are proposed to manage weeds in rice crops in Latin America within a framework of sustainability and based on the principles of integrated weed management. Two aspects

are emphasized: improved use of herbicides and how to avoid weeds from becoming resistant to the chemical compounds found in herbicides. The main factors affecting the increase in weed control costs are also described, and a list of the main herbicides currently used in rice is presented along with specific recommendations on how to select herbicides based on their characteristics.

Introducción

Cultivado en pequeñas fincas familiares de menos de 4 ha o en grandes extensiones irrigadas, el arroz constituye una fuente importante de subsistencia y empleo para millones de familias campesinas en América Latina. Solamente en Colombia, la cadena del arroz genera más de 50,000 empleos directos en el sector agrícola y 4,500 en la industria (Agricultura de las Américas, 2007). Su importancia económica y social es innegable.

En cualquier sistema de producción de arroz, las malezas son una de las principales restricciones biológicas de esa producción; podría decirse que son las compañeras inseparables de los arrozales. En un estudio que cubrió el 80% del área mundial sembrada con este cultivo, Johnson (1996) encontró que las malezas se consideraban el 'freno' biológico más fuerte de la producción de arroz. Las pérdidas que causan las malezas al arroz son severas: pueden reducir el rendimiento a valores insignificantes o llevar a la pérdida casi total de la cosecha. Estas pérdidas varían entre los países según la composición de la flora de malezas, el sistema de siembra y de labranza, el manejo del agua y la nutrición del cultivo. Ahora bien, los agricultores no son concientes del problema que plantean las malezas porque los daños que éstas hacen son menos espectaculares que los causados por insectos o por agentes patógenos.

Las malezas causan *daños al arroz* en forma directa o indirecta:

- El **daño directo** es la interferencia de las malezas con el crecimiento del cultivo comercial. Ampong-Nyarko y de Datta (1991) calculan que las pérdidas de arroz 'paddy' (en cáscara) por esta razón ascienden al 10% de la producción mundial del grano, es decir, a más de 46 millones de toneladas por año. Estos autores revelan que los costos del control de malezas, en el ámbito mundial, ascienden a un 5% del costo total de producción, lo que equivale a unos U$3500 millones al año. En total, las pérdidas debidas a la interferencia de las malezas y al costo de su control equivalen a un 15% de la producción anual de arroz en el mundo.
- El **daño indirecto** es igualmente importante. La lista siguiente contiene ejemplos de este tipo de daño (Puentes, 1999):

  - Hospedan insectos fitófagos y agentes patógenos; por ejemplo, *Digitaria* sp. hospeda insectos de los órdenes Homoptera, Lepidoptera y Diptera, y nematodos de los géneros *Meloidogyne* y *Pratylenchus*.
  - Dificultan la cosecha, tanto la manual como la mecánica; es el caso de las especies trepadoras de los géneros *Ipomoea* y *Vigna.*
  - Reducen la calidad del grano cosechado; por ejemplo, el arroz rojo silvestre de las especies *Oryza sativa* y *O. rufipogon* contamina el arroz común.
  - Deprecian las tierras y aumentan el costo normal del control de malezas; esto ocurre, por ejemplo,

en los lotes muy infestados con arroz rojo (*Oryza* sp.) o con coquito (*Cyperus rotundus*).
- Obstruyen los canales de riego.

Además, *afectan seriamente al productor* arrocero porque el costo del control de malezas es muy alto, por las siguientes razones:

- El precio del combustible, de la mano de obra para las labores de campo relacionadas, de los herbicidas y de otros factores de la producción arrocera anexos a ese control es considerable.
- El precio de las cosechas fluctúa (en algunos países es relativamente bajo) y un control de malezas costoso reduce considerablemente las utilidades.
- No se han difundido soluciones para el manejo de las malezas que sean, simultáneamente, menos costosas (o sea, económicamente viables), más eficaces y ambientalmente sostenibles.

En Colombia, la estadística arrocera para el intervalo entre 1992 y 2003 indica que el control de las malezas corresponde al *costo más alto (17.7%) de la producción* de arroz; lo siguen la siembra (16.4%), la recolección (13.6%), la fertilización (12.6%), la preparación del terreno (9.3%), el control de enfermedades (7.5%), el trasporte (7.2%), el arriendo (6.5%) y el control de insectos dañinos (4.2%) (Quintero et al., 2004.). Los estudios realizados por la Federación Nacional de Arroceros de Colombia (Fedearroz, 2009) demuestran que el costo de la producción de arroz en Colombia se ha incrementado en cerca del 34% entre los años 2000 y 2007; esta situación es crítica, si se consideran las actuales condiciones de apertura económica y de globalización de los mercados, que exigen un aumento de rentabilidad (por disminución de costos) para poder mantenerse en el sector.

En resumen, el incremento en los **costos del control** de malezas en el cultivo del arroz depende de varios factores:

- La dependencia excesiva de los herbicidas (aun reconociendo que éstos son una herramienta muy útil).
- El carácter altamente específico de los herbicidas modernos, que exige la aplicación de mezclas de varios de estos productos, si se quiere controlar la diversidad de arvenses de un arrozal; en consecuencia, la compra de varios herbicidas aumenta el costo del control.
- La baja rentabilidad de la mayoría de los cultivos que se rotan con el arroz.
- El poco uso que hacen los arroceros de semilla certificada y de asistencia técnica calificada.
- La tenencia de la tierra en las zonas arroceras; en Colombia, por ejemplo, un gran número de cultivadores de arroz son arrendatarios y no consideran prioritario, por tanto, el esfuerzo por evitar una infestación del campo con malezas.
- La visión de corto plazo con que se ha enfrentado, generalmente, el manejo de las malezas; falta un enfoque de largo plazo que permita anticiparse al problema.
- La deficiente aplicación del conocimiento actual de las malezas; en consecuencia, las decisiones sobre el manejo de malezas carecen del apoyo racional que las haría oportunas y eficaces.

Tanto en América Latina como en América del Norte, los herbicidas han sido la herramienta dominante y más popular para el control de las malezas (Labrada, 2003). Sin los herbicidas no hubiera sido posible controlar muchas especies de malezas y no sería siquiera concebible sin ellos la producción de arroz en muchos países de la región. ¿Cuál es entonces el problema que plantean, para algunos investigadores,

estos insumos? En pocas palabras, el siguiente: el manejo de las malezas del arroz no debe depender de una sola herramienta.

Manejo de las malezas

El problema de las malezas se debe enfrentar poniendo en marcha programas sostenibles de manejo, que se apoyen principalmente en el conocimiento de *la biología y la ecología* de esas especies de malezas. Es éste un requisito importante para lograr los rendimientos esperados de grano y obtener, a la vez, una *reducción de las poblaciones* de malezas, incluyendo aquí las contenidas en el banco de semillas (Labrada, 2003).

Manejo bajo un marco de sostenibilidad

Primer paso. Hacer un mapeo y un seguimiento (monitoreo) continuos de las especies adventicias en una propiedad (provenientes de países, zonas, fincas y lotes diferentes) no sólo en los campos destinados a la siembra de arroz sino en los bordes de esos campos; el objetivo es identificar tempranamente tres entidades:

- Las especies de malezas que pueden ser muy nocivas.
- Los biotipos de malezas resistentes a los herbicidas.
- Los cambios ocurridos en la composición de la flora de malezas.

Segundo paso. Poner especial énfasis en las acciones que se realizarán y en la prioridad que ellas tienen. Según el problema particular que representen las malezas, pueden tomarse diferentes tipos de acciones (Joseph plains..., 2004):

- ***Erradicación:*** Es una acción dirigida a evitar que las plantas de las malezas produzcan semillas viables en todo el campo; consiste en eliminar todas las plantas que emerjan durante un ciclo de cultivo del arroz. La erradicación es, sin duda, una acción extrema para casos particulares, como la aparición de un biotipo resistente a algunos herbicidas o la aparición de una especie extremadamente nociva. Es como un incendio que debe apagarse.
- ***Control:*** Mediante diferentes medidas o herramientas, se tratan áreas infestadas de malezas de un campo o un arrozal para que disminuya, en general, esa infestación. El objetivo es eliminar la mayor parte de las plantas de malezas que hayan emergido, antes de que alcancen su fase reproductiva, evitando así que produzcan semilla y se multipliquen.
- ***Contención:*** Con esta acción se tratan porciones infestadas del campo para que la maleza no se extienda más allá de las zonas tratadas. La principal área de infestación puede permanecer sin tratar.
- ***Reducción:*** Con esta acción se trata la infestación hasta que la densidad o la tasa de expansión de las malezas (o ambos parámetros) se reduzcan a un nivel aceptable. Ahora bien, el umbral de competencia de varias especies de malezas consideradas como muy difíciles es de cero o de unas pocas plantas por m^2. Solamente 4 ó 5 plantas/m^2 de una especie muy competidora pueden reducir significativamente el rendimiento de un cultivo de arroz (Weed management:..., 2003).

El plan anual de manejo de las malezas en las planicies Joseph, en Idaho, EE.UU., que tienen cerca de 180,000 acres (72,900 ha) es un ejemplo de un programa de manejo en que se aplican las acciones antes descritas a través de las siguientes actividades:

- Prevención y educación.

- Inventario, con seguimiento o mapeo (o con ambas operaciones).
- Acciones de control (medidas químicas, mecánicas y de manejo del cultivo).
- Seguimiento ('monitoreo') de especies sometidas a acciones de erradicación.
- Programa de biocontrol (aunque no siempre es posible implementar medidas de biocontrol).

Este plan regional involucra tanto a las instituciones gubernamentales como a los productores. Las acciones realizadas en un plan de este tipo van precedidas por la prioridad que se les asigna; en el caso considerado (planicie de Idaho), las acciones se caracterizaron como críticas, de alta prioridad, de prioridad moderada, y de baja prioridad (Joseph plains..., 2004).

Manejo integrado de malezas

Mucho se ha publicado acerca de los métodos de control de las malezas y del control integrado (o integral) de malezas (MIM). El MIM combina, en un cultivo, dos aspectos importantes:

- Los principios básicos del control de malezas.
- Las prácticas, materiales y estrategias que mantienen las plantas vigorosas y que minimizan, al mismo tiempo, el daño que les causarían las malezas (Smith, 1994).

El MIM combina, en un arrozal, los siguientes elementos:

- Un cultivar que tenga características tales como competir bien con las malezas, poseer principios alelopáticos[1], y estar bien adaptado a las condiciones ambientales de la localidad en que se siembre.
- El manejo de la densidad de plantas y de la nutrición (lo que le da ventaja al cultivo sobre las malezas).
- El manejo de la labranza, del método de siembra (siembra directa con semilla seca o pregerminada, o trasplante) y del agua de riego.
- Una rotación de cultivos cuidadosamente planeada.
- El manejo de la sanidad del cultivo (insectos dañinos y enfermedades).
- Las operaciones de cosecha adecuadas para que no se dispersen las semillas de las malezas.
- El empleo del control biológico, cuando esté disponible.
- El uso eficaz, seguro y sostenible de los herbicidas.
- Las prácticas de control preventivo de malezas que reduzcan el banco de semillas en el suelo.

Ahora bien, la realidad es que muchos de los elementos que se requieren para lograr un sistema eficaz de MIM están limitados o no están disponibles (Smith, 1994).

La tecnología del control moderno de malezas (el MIM) incluye prácticas preventivas, agronómicas, mecánicas, biológicas y químicas; de estas últimas, el empleo de herbicidas es, probablemente, el componente más importante del manejo de las malezas (Smith, 1994; Labrada, 2003). No obstante, si el uso que se da a los herbicidas no es sostenible, habrá consecuencias negativas de diversa índole, como las siguientes:

- Aparición de biotipos resistente de malezas.
- Cambios en la composición de la flora de malezas, es decir, especies que antes eran secundarias se vuelven dominantes, y pueden crean un problema más grave que el causado

1. Alelopatía es el efecto que causa un planta en otra u otras mediante compuestos químicos que libera (Sampietro, s.f.).

por las especies que dominaban anteriormente.
- Efectos deletéreos en los diversos compartimentos del ambiente, particularmente en el suelo y en el agua, por la acumulación de residuos químicos.

Elementos básicos del manejo

Algunos de los problemas del manejo de las malezas en la región latinoamericana se describen enseguida con más precisión, aunque hayan sido mencionados antes (Labrada, 2003; Johnson, 1996; Barnard y Bell, 1998):

1. Ausencia de ***conocimientos*** sobre la biología de las malezas, un tema que debe ser prioritario.
2. Tomar medidas de control de malezas para un ***plazo largo*** en el que pueda lograrse una reducción sustancial de las poblaciones de malezas; hasta ahora se han tomado medidas para un ciclo de siembra, generalmente, y sólo durante un período de su ciclo.
3. Rotar el arroz con cultivos sembrados en hileras que permitan emplear el control mecánico; gran parte del problema de las malezas del arroz proviene del monocultivo durante muchos años en el mismo sitio.
4. Sembrar cultivares de arroz que tengan ***actividad alelopática***, es decir, segregan en su entorno sustancias que impidan el crecimiento de algunas malezas (Lin et al., 2004; Olofsdotter, 1998).
5. Sembrar cultivares que ***compitan bien*** con las malezas. Las variedades modernas de alto rendimiento son menos competitivas con las malezas que muchas variedades tradicionales de arroz, a las que han sustituido. Por ejemplo, las variedades tradicionales o antiguas son de porte alto, de hoja caída, más tardías y de gran vigor vegetativo, caracteres que las hacen muy competitivas; las variedades modernas, en cambio, combinan el porte bajo, la precocidad y las hojas erectas, es decir, que a su alto rendimiento potencial se ha sacrificado, al parecer, su habilidad competidora con las malezas. No obstante, algunos trabajos recientes indican que hay cultivares *modernos semienanos* de alta productividad capaces de competir eficazmente con las malezas. Mejoradores y malherbólogos deben trabajar en colaboración para obtener este tipo de cultivares de arroz: que sean competitivos y que tengan efectos alelopáticos.
6. Reconsiderar el uso de ***altas densidades*** de siembra. Se ha recomendado tradicionalmente aumentar la densidad de siembra del arroz para contrarrestar la competencia que hacen las malezas; sin embargo, varios estudios han demostrado que la alta densidad, en siembras a voleo (200 a 300 kg de semilla por hectárea) incrementa el ataque de patógenos y la sombra que unas plantas hacen a otras (autosombreado). Por otra parte, algunas malezas (como el complejo de *Digitaria* spp. en Colombia) toleran la competencia del arroz aun sembrado en altas densidades.
7. Aplicar ***medidas preventivas*** —como limpieza del campo y de sus bordes, evitar la producción de semilla y la dispersión de las malezas de difícil manejo— que muchos productores de arroz han olvidado.
8. Controlar las malezas difíciles con '***quema química***' en presiembra empleando herbicidas no selectivos y que no tienen actividad biológica en el suelo para las plantas; esto es, las plantas no los toman del suelo.
9. Sembrar siempre ***semilla limpia***.
10. Sembrar el ***arroz en surcos*** o en hileras evita el problema de las altas

densidades antes mencionado, permitiría emplear otros métodos de control de malezas (además del químico), y abre la posibilidad de sembrar cultivos intercalados: esta práctica, además, economiza semilla. Sathyamoorthy et al. (2004), por ejemplo, demuestran que la siembra intercalada de arroz con una leguminosa, que se usa luego como abono verde, reduce las poblaciones de malezas y mejora la fertilidad del suelo. Ahora bien, si esta opción promisoria de la siembra directa del arroz en hileras se compara con el trasplante del arroz —método que requiere menos herbicidas porque en él la lámina de agua permanente es una herramienta de control de las malezas— es obvia la necesidad de capacitar a los agricultores en el uso correcto de los herbicidas (New Agriculturist On-line, 2009).

11. Manejar el ***agua de riego***. La competencia que hacen las malezas al arroz sembrado bajo el sistema con riego intermitente es muy alta; en efecto, esta modalidad de riego no es una estrategia para el control de las malezas, porque crea un ambiente propicio para su crecimiento y proliferación. No obstante, cuando es posible *mantener una lámina* de agua en el arrozal, el arroz puede soportarla pero las malezas no acuáticas no la tolerarían, tal como se indicó anteriormente (Rainbolt y Bennett, 2005).
12. La primera medida de control de malezas debe hacerse en ***fecha temprana***. Las pérdidas de rendimiento del arroz están ligadas, generalmente, a un control tardío, porque las plantas de arroz no logran recuperarse de la competencia que hacen las malezas en los primeros días de vida del cultivo (Weed management:..., 2003).
13. Usar los ***herbicidas con criterio sostenible***. El uso no sostenible de estos productos trae consigo consecuencias negativas, por ejemplo: aparecen biotipos de malezas resistentes; hay cambios en la composición de la flora de malezas, es decir, especies que antes eran secundarias se vuelven dominantes y crean un problema más grave que el causado por las especies que anteriormente dominaban el campo; hay efectos deletéreos en los diversos compartimentos del ambiente, particularmente en el suelo y en el agua, por la acumulación de residuos químicos.

Control temprano de las malezas en arroz

En varios experimentos se ha demostrado la utilidad de tomar medidas de control de las malezas en una época temprana del desarrollo de los cultivos, particularmente del arroz.

- Kropff y Lotz (1993) calcularon las ***pérdidas de rendimiento*** causadas por la competencia temprana y tardía de *Echinochloa crus-galli* (mijo de los arrozales, pata de gallo, capín arroz, zacate de corral, arrocillo) en cultivos de arroz trasplantado. Para predecir estas pérdidas usaron dos variables: la densidad de la maleza y un índice denominado área foliar relativa (Figura 1). Se obtuvieron los siguientes resultados:

  – cuando las malezas emergieron muy pronto (por competencia temprana), es decir, 5 días después del trasplante (DDT), el rendimiento se redujo del 10% (densidades bajas) al 40% (densidades altas);

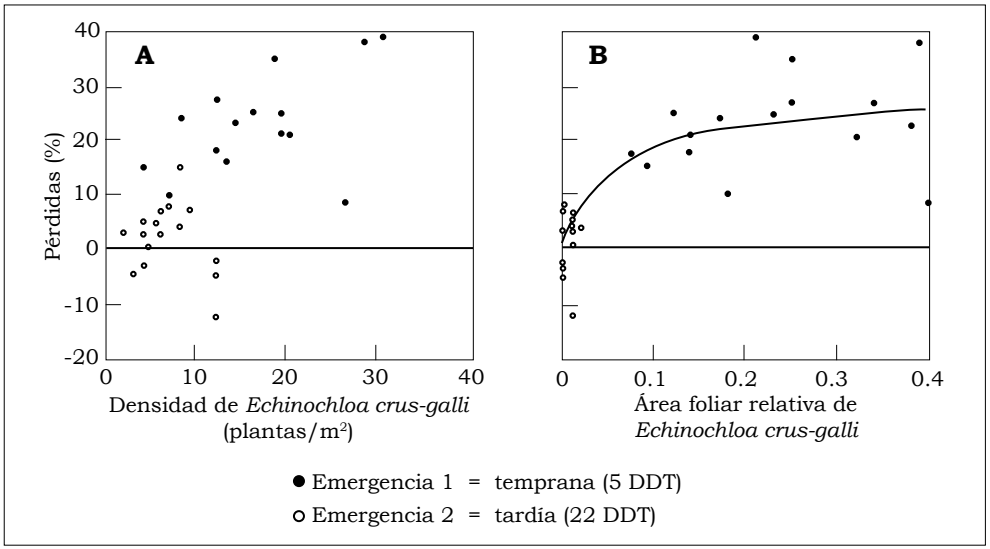


Figura 1. Predicción de la pérdida de rendimiento de arroz de trasplante partiendo de la densidad de plantas y del área foliar relativa de *Echinochloa crus-galli,* 36 días después del trasplante. Los puntos representan valores observados. La línea sólida fue ajustada empleando un modelo basado en el área foliar. DDT = días después del trasplante. (Tomada de Kropff y Lotz, 1993.)

– cuando la cohorte de malezas emergió tardíamente (22 DDT), el rendimiento del arroz se redujo en menos del 10% a densidades bajas (Figura 1,A).

El índice de área foliar relativa, que es una función del área foliar de la maleza y del cultivo, resultó ser una mejor variable que la densidad de la maleza para describir o predecir las pérdidas de rendimiento del arroz (Figura 1,B); hay una buena explicación de este índice en la obra aquí comentada.

- Kropff et al. (1993) hicieron experimentos de ***densidad de plantas*** con arroz de siembra directa y con poblaciones naturales de *E. crus-galli* y obtuvieron los siguientes resultados:

  – la cohorte de malezas que emergió tempranamente tenía una densidad de 54 plantas/m² (competencia temprana) 2 días después de la emergencia (DDE) del cultivo;
  – la cohorte de malezas que emergió tardíamente (competencia tardía), a los 22 DDE, tenía una densidad de 13 plantas/m². Esta baja densidad se debió a la competencia que ejerció el arroz, la cual se reflejó en la producción de materia seca de este cultivo (Figura 2).

  La competencia temprana de *E. crus-galli* redujo en cerca de 2000 kg/ha (Figura 2,A) la materia seca producida por el arroz, comparando con el arroz que creció solo; en cambio, el efecto negativo en el rendimiento del arroz de la cohorte de malezas que emergió tardíamente fue casi nulo (Figura 2,D).

- Se hicieron otros experimentos en Pompeya (Meta), Colombia, durante

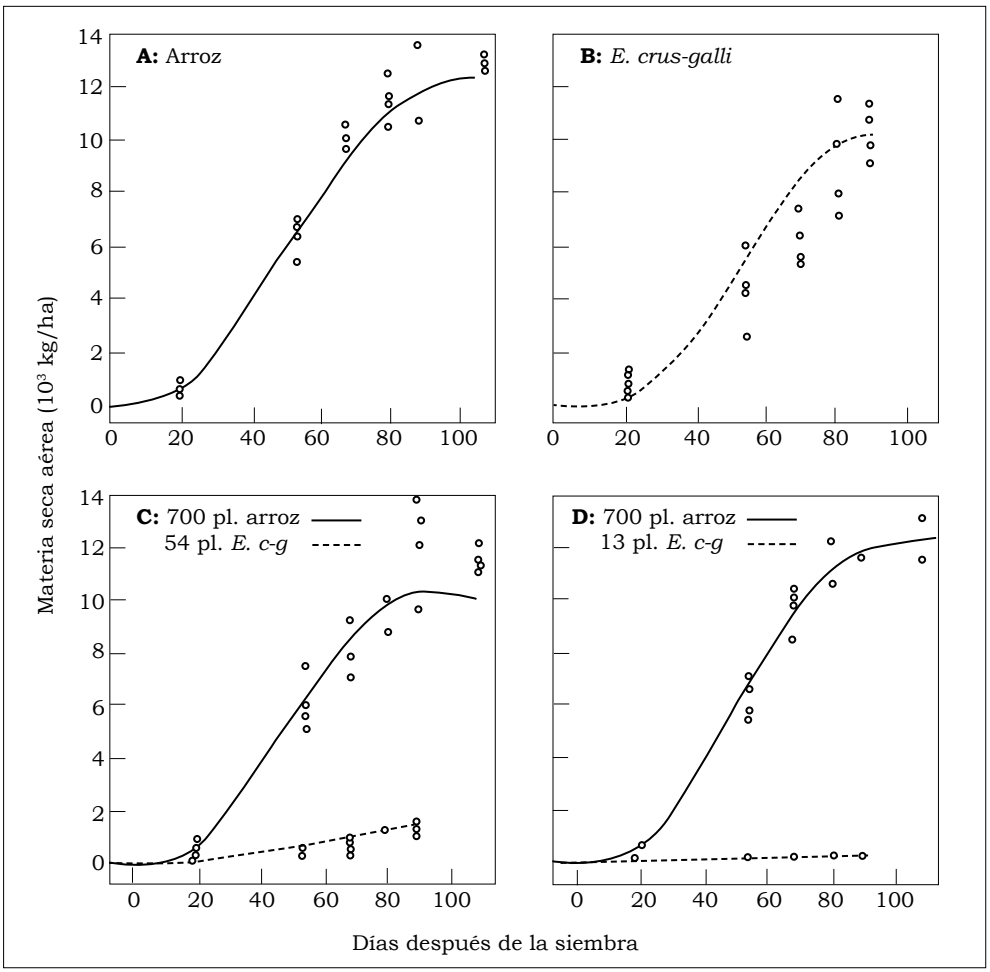


Figura 2. Materia seca total de arroz y de la maleza *Echinochloa crus-galli*, cuando las dos especies crecen solas (A y B) o juntas en competencia (C y D) en cultivos de siembra directa. En C, *E. crus-galli* emergió 2 días después del arroz (competencia temprana), y en D, *E. crus-galli* emergió 22 días después que el arroz (competencia tardía). (Tomada de Kropff et al., 1993.)
pl. = plantas; *E. c-g.* = *Echinochloa crus-galli.*

1999 (Fuentes y Rodríguez, datos sin publicar), en los que se evaluó el efecto en el rendimiento de los siguientes ***herbicidas***: preemergentes aplicados solos (Cuadro 1), mezclas de preemergentes (Cuadro 2) y mezclas de preemergentes con posemergentes en aplicaciones tempranas (Cuadro 3); los resultados de estos tratamientos pueden resumirse así:

- aumentó el *rendimiento* del arroz en comparación con un testigo en el cual se tomaron medidas de control de las malezas sólo después de 35 DDE del cultivo; el aumento del rendimientos varió entre el 3% y el 18%, según el tratamiento (Cuadros 1, 2 y 3).

Cuadro 1. Rendimiento del arroz que recibió diferentes aplicaciones de herbicidas preemergentes, en Pompeya (Meta), Colombia, en 1999. (C. Fuentes y A. Gutiérrez, datos sin publicar.)

Tratamiento y dosis (litros o kg/ha)[a]	Rendimiento de grano[b] (kg/4 m², N = 6)	Aumento de rendimiento respecto al testigo[c] (%, N = 6)
Pre 1, D1	1.74	5.9
Pre 1, D2	1.90	5.7
Pre 1, D3	1.67	5.0
Pre 2	1.85	5.9
Pre 3	1.89	6.7
Pre 4	1.85	6.1

a. Pre 1, Pre 2, Pre 3 y Pre 4 corresponden a cuatro herbicidas preemergentes diferentes; D1, D2 y D3 indican dosis baja, dosis media y dosis alta, respectivamente, del herbicida 1.
b. Los valores son promedios de dos experimentos y en cada experimento hay tres bloques en un diseño de bloques completos al azar; N = número de observaciones del rendimiento en tres unidades experimentales y en dos experimentos.
c. El testigo estuvo sin control de malezas durante los primeros 35 después de la emergencia.

Cuadro 2. Rendimiento del arroz que recibió aplicaciones de mezclas de herbicidas preemergentes, en Pompeya (Meta), Colombia, en 1999. (C. Fuentes y A. Gutiérrez, datos sin publicar.)

Tratamiento y dosis (litros o kg/ha)[a]	Rendimiento de grano[b] (kg/4 m², N = 6)	Aumento de rendimiento respecto al testigo[c] (%, N = 6)
Pre 1, D1 + Pre 2	2.02	13.3
Pre 1, D1 + Pre 3	1.82	6.2
Pre 1, D1 + Pre 4	1.68	3.5
Pre 1, D1 + Pre 5	1.78	8.1
Pre 1, D1	1.96	9.3
Pre 1, D2	1.85	6.8

a Pre 1, Pre 2, Pre 3, Pre 4 y Pre 5 corresponden a cinco herbicidas preemergentes diferentes; D1 y D2 indican dosis baja y dosis media, respectivamente, del herbicida 1.
b. Los valores son promedios de dos experimentos y en cada experimento hay tres bloques en un diseño de bloques completos al azar; N = número de observaciones del rendimiento en tres unidades experimentales y en dos experimentos.
c. El testigo estuvo sin control de malezas durante los primeros 35 después de la emergencia.

Todos los resultados anteriores ilustran los beneficios de tomar medidas de control de las malezas desde una época muy temprana en el cultivo del arroz.

Es innegable que las prácticas de control de las malezas han sido muy influenciadas por la disponibilidad de los herbicidas selectivos. Los herbicidas son, en realidad, un componente del

Cuadro 3. Rendimiento del arroz que recibió aplicaciones tempranas (12 días después de la emergencia del arroz) de mezclas de tanque de herbicidas preemergentes y posemergentes, en Pompeya (Meta), Colombia, en 1999.
(C. Fuentes y A. Gutiérrez, datos sin publicar.)

Tratamiento y dosis (litros o kg/ha)[a]	Rendimiento de grano[b] (kg/4 m^2, N = 6)	Aumento de rendimiento respecto al testigo[c] (%, N = 6)
Pre 1, D1 + Pos 1	1.85	6.6
Pre 1, D1 + Pos 2	1.77	10.2
Pre 1, D1 + Pos 3	1.87	11.1
Pre 1, D1 + Pos 4	1.87	9.8
Pre 1, D2 + Pos 1	2.06	18.1
Pre 1, D2 + Pos 2	1.54	5.3
Pre 1, D2 + Pos 3	1.71	7.4
Pre 1, D2 + Pos 4	1.98	14.7
Pre 2 + Pos 4	1.66	5.0
Pre 3 + Pos 5	1.82	9.2

a. Pre 1, Pre 2 y Pre 3 corresponden a cinco herbicidas preemergentes diferentes; Pos 1, Pos 2, Pos 3, Pos 4 y Pos 5 representan cinco herbicidas posemergentes diferentes; D1 y D2 indican dosis baja y dosis media, respectivamente, del herbicida 1.
b. Los valores son promedios de dos experimentos y en cada experimento hay tres bloques en un diseño de bloques completos al azar; N = número de observaciones del rendimiento en tres unidades experimentales y en dos experimentos.
c. El testigo estuvo sin control de malezas durante los primeros 35 después de la emergencia.

sistema de manejo de las malezas en la producción actual del arroz y de otros cultivos. ¿Cómo hacer entonces un ***mejor uso de los herbicidas***? La respuesta está en los criterios con que debe enfocarse este uso:

- Primero, *entender las malezas*, es decir, el papel que desempeñan en los agroecosistemas. Las malezas han estado presentes desde el inicio de la civilización y es poco probable que desaparezcan.
- Segundo, *conocer los herbicidas*, o sea, su actividad y los efectos que causan (Cardina et al., 1999).
- Tercero, *seleccionar el compuesto* adecuado para el problema particular de malezas que se quiere resolver; de este modo se ajusta el uso agrícola a la percepción ambientalista, que es hoy fundamental para la opinión pública.
- Cuarto, *diseñar un programa* de manejo de malezas basado en la selección racional del herbicida adecuado para el problema particular que se enfrenta. En el cultivo del arroz hay diversos compuestos herbicidas que permiten aplicar el programa en varias etapas:
  - en presiembra, el glifosato y el paraquat controlan malezas difíciles, como el arroz rojo;
  - en preemergencia, los que ejercen su actividad principalmente en el suelo;
  - en posemergencia hay un grupo considerable de compuestos selectivos que no afectan el arroz pero actúan, según el compuesto, como graminicidas, como control de dicotiledóneas o para controlar ciperáceas.

El Cuadro 4 presenta un listado de herbicidas que actualmente se usan en el cultivo del arroz.

Selección de herbicidas para el manejo de malezas

Para elegir, aplicando el tercer criterio antes considerado, el herbicida que resolverá un problema de malezas, hay que estudiar los puntos siguientes:

Características del herbicida

Comportamiento técnico
El herbicida elegido debe controlar el mayor número posible de especies importantes de malezas que aparezcan en un campo de arroz; asimismo, debe ser selectivo (daña las malezas pero no el cultivo) en la mayoría de las circunstancias. En síntesis, el herbicida debe ser ***versátil***.

Comportamiento en el suelo
El comportamiento del herbicida en el suelo debe satisfacer dos condiciones:

- No causar *problemas ambientales*, por ejemplo, contaminación de cuerpos de agua o biomagnificación[2]
- Su *persistencia* debe ser baja, es decir, no causará fitotoxicidad a los cultivos de cobertura que se desarrollen después del cultivo comercial ni a los que se siembren en rotación.

Residuos
Normalmente, los herbicidas, como tales, no dejan residuos en los productos cosechados.

Toxicología
Hay una serie de parámetros que miden el perfil toxicológico de un compuesto químico (p. ej., un herbicida de síntesis química):

- Uno de ellos es una dosis letal media, $\mathbf{DL_{50\ aguda\ oral}}$, es decir, la dosis, expresada en mg del compuesto por kg de peso de un animal, que administrada de una sola vez por vía oral a un grupo concreto de animales causa la muerte al 50% de ellos en un período de 14 días después de iniciado el tratamiento.
- Otro es la concentración letal media, $\mathbf{CL_{50}}$, es decir, la concentración del compuesto en el aire que, al ser inhalado durante un período de 4 horas, causa la muerte al 50% de los animales de prueba, en un período de 14 días después de iniciado el tratamiento (Ministerio del Trabajo y Asuntos Sociales de España e Instituto Nacional de Higiene en el Trabajo, 2009).

Valores altos de ambos parámetros indican que los problemas toxicológicos que causaría el compuesto son de menor gravedad.

Uso fácil
Un herbicida debe ser fácil de manejar por un agricultor en aspectos como los siguientes:

- La mezcla de aspersión debe prepararse sin dificultad y debe ser estable, esto es, homogénea.
- Así preparada, la mezcla no necesitará equipos especiales o condiciones particulares, como volúmenes de agua extremadamente

2. Biomagnificación es la tendencia de algunos productos químicos a acumularse a lo largo de la cadena trófica, exhibiendo concentraciones sucesivamente mayores al ascender el nivel trófico; por ello, la concentración del producto en el organismo consumidor es mayor que su concentración en el organismo consumido (Green Facts, 2009).

Cuadro 4. Herbicidas usados actualmente en el cultivo del arroz.

Compuesto (nombre técnico)	Grupo químico	Modo y sitio en que actúa[a]
Herbicidas no selectivos aplicados en presiembra		
imazapir	Imidazolinonas	Inhibición de la enzima ALS
glifosato	Derivados de la glicina	Inhibición de la enzima EPSP sintasa
paraquat	Derivados de la glicina	Inhibición del trasporte de electrones en el FS I
glufosinato de amonio	Acido fosfínico	Inhibición de la glutamina sintetasa
Herbicidas preemergentes		
tiobencarbo	Tiocarbamatos	Inhibición de síntesis de lípidos (no ACC-asa)
butaclor	Cloroacetamidas	Inhibición de división celular
clomazone	Isoxazolidinonas	Inhibición de biosíntesis de carotenoides
butaclor	Cloroacetamidas	Inhibición de división celular
oxadiazón	Oxadiazoles	Inhibe PPO (protoporfirinógeno oxidasa)
oxifluorfén	Difeniléter	Inhibe PPO (protoporfirinógeno oxidasa)
butaclor	Cloroacetamidas	Inhibición de división celular
pendimetalina	Dinitroanilidas	Inhibición del ensamblaje de microtúbulos
oxadiargil	Oxadiazoles	Inhibe PPO (protoporfirinógeno oxidasa)
pretilaclor	Cloroacetamidas	Inhibición de división celular
pendimetalina	Dinitroanilidas	Inhibición del ensamblaje de microtúbúlos
tiazopir	Piridazinas	Inhibición del ensamblaje de microtúbulos
Herbicidas posemergentes		
metsulfuron metil	Sulfonilureas	Inhibición de ALS
2,4-D	Ácidos fenoxicarboxílicos	Auxinas sintéticas (actúa como los reguladores de crecimiento; p. ej., el ácido indolacético)
clefoxydim	Ciclohexanadionas (ACC-asa)	Inhibición de acetil-CoA carboxilasa
bentazon	Benzotiadiazinonas	Inhibición de fotosíntesis en FS II
propanil	Amidas	Inhibición de fotosíntesis en FS II
bensulfurón	Sulfonilureas	Inhibición de la enzima ALS
clorimurón	Sulfonilureas	Inhibición de la enzima ALS
cyhalofop	Ariloxifenoxipropanoatos	Inhibición de acetil-CoA carboxilasa (ACC-asa)
quinclorac	Ácido carboxílico quinolínico	Auxinas sintéticas (actúa como los reguladores de crecimiento; p. ej., el ácido indolacético)
fenoxaprop etil	Ariloxifenoxipropanoatos	Inhibición de acetil-CoA carboxilasa (ACC-asa)
azimsulfurón	Sulfonilureas	Inhibición de la enzima ALS
triasulfurón	Sulfonilureas	Inhibición de la enzima ALS

(Continúa)

Cuadro 4. (Continuación.)

Compuesto (nombre técnico)	Grupo químico	Modo y sitio en que actúa[a]
bispiribac sodio	Pirimidiniltiobenzoatos	Inhibición de la enzima ALS
halosulfurón metil	Sulfonilureas	Inhibición de la enzima ALS
pirazosulfurón	Sulfonilureas	Inhibición de la enzima ALS
etoxisulfurón	Sulfonilureas	Inhibición de la enzima ALS
triclopir	Ácidos piridincarboxílicos	Auxinas sintéticas (actúa como los reguladores de crecimiento; p. ej., el ácido indolacético)
picloram	Ácidos piridincarboxílicos	Auxinas sintéticas (actúa como los reguladores de crecimiento; p. ej., el ácido indolacético)

a. ALS = la enzima aceto-lactato sintasa; EPSPS = la enzima 5-enol-piruvil-shiquimato-3-fosfato sintasa; FS = fotosistema.

Tomado de HRAC, 2009.

altos o bajos, u hora específica de aplicación, entre otros.
- Tampoco exigirá un grado muy particular de humedad del suelo.

Regularidad en la acción
Muchas veces, la acción de un herbicida es irregular y aún no se conoce la causa de este comportamiento. Por ejemplo, la actividad de un herbicida que se aplica al suelo está relacionada, generalmente, con la humedad del suelo; cuanto más soluble es un producto, el suelo debe estar más húmedo.

Eficiencia
La relación 'costo/uso' de un herbicida debe ser baja. Esta relación indica el costo del tratamiento de una hectárea con un herbicida particular; en ella entran, por tanto, la dosis de uso (litros o kg/ha) y el precio del producto por litro o por kg, así como el costo de la aplicación.

Parámetros que definen el herbicida

El herbicida seleccionado debe ajustarse a parámetros tanto de tipo ambiental como a aquéllos relacionados con su manejo en el campo.

Parámetros del compuesto
Son, principalmente, las constantes físicas y químicas que caracterizan el herbicida como compuesto químico. Por ejemplo:

- **K_d** Es el coeficiente denominado 'partición suelo/solución acuosa del suelo', que relaciona la [cantidad de compuesto afín con el suelo] con la [cantidad de compuesto afín con la solución acuosa del suelo]. Mide, por tanto, la adsorción del compuesto en el suelo: valores altos indican que el compuesto es fuertemente adsorbido por el suelo. Según el tipo de suelo, este coeficiente puede variar en un mismo compuesto.
- **K_{oc}** Proveniente de la expresión $K_{oc} = K_d/f_c$ —donde f_c representa la cantidad de carbono orgánico de un suelo en particular y K_d es el coeficiente antes descrito— este coeficiente normaliza la adsorción del compuesto herbicida partiendo del contenido de materia orgánica del suelo. Valores altos de K_{oc} indican que el compuesto es fuertemente adsorbido por la materia orgánica. Según el tipo de suelo, este coeficiente puede variar en un mismo compuesto.

- **K_{ow}** Este coeficiente se denomina de 'partición octanol/agua'. Se expresa también como log K_{ow}. Mide la afinidad del compuesto por los lípidos de los organismos. Valores altos (log K_{ow} > 3.5 a 4.0) indican que el compuesto tiene mayor probabilidad de ligarse con esos lípidos.
- **Solubilidad en agua.** Este coeficiente mide la posibilidad de que el compuesto sea lixiviado en el perfil del suelo. En teoría, a mayor solubilidad en agua, mayor es la posibilidad de lixiviación del compuesto. Ahora bien, la solubilidad en agua no es el único parámetro que controla la movilidad de un herbicida en el perfil del suelo: también la controlan el tipo de molécula del compuesto, el contenido de arcilla del suelo y el contenido de materia orgánica del suelo.
- **pK_a** Es la constante de disociación ácida del compuesto, que indica si éste se comporta como un ácido (normalmente, como un ácido débil). En los compuestos neutros (que no se disocian) o en los que son cationes no se considera esta constante. Otros compuestos, como los llamados '*zwitteriones*' (término de origen alemán que indica duplicidad), se cargan eléctricamente en diferentes sitios de su molécula (según el pH de la solución en que se encuentren) y tienen, por tanto, varios valores de pK_a.
- **Degradación.** Es la facilidad y rapidez con que el compuesto experimenta una degradación biótica o abiótica. Se mide por la vida media ($T_{1/2}$) del compuesto, que es el tiempo necesario para que se degrade éste en un 50%.
- **Factor de bioconcentración (BCF).** Indica el grado de bioacumulación en las cadenas tróficas. Los compuestos lipofílicos (cuyo valor de K_{ow} es alto) tienen mayor probabilidad de acumularse en los tejidos de los organismos. Cuanto más alto el BCF, mayor tendencia tiene el compuesto a bioacumularse.

Parámetros del suelo

Son tres los que caracterizan un suelo respecto al herbicida:

- La cantidad de materia orgánica, de arcilla, de limo y de arena del suelo, es decir, los componentes que definen su textura.
- El grado de humedad del suelo.
- El pH del suelo.

El Cuadro 5 presenta el valor de algunos de estos parámetros en varios herbicidas usados en los cultivos de arroz.

Prevención y manejo de la resistencia a los herbicidas

La siguiente sección está basada en las recomendaciones dadas por el Comité de Acción sobre la Resistencia a los Herbicidas (HRAC, sus siglas en inglés). Todos los casos en que falla el control de las malezas cuando se usan herbicidas no se deben, necesariamente, a la aparición de biotipos resistentes a los compuestos aplicados. Las recomendaciones que se darán enseguida ayudan a establecer cuatro puntos decisivos:

- Primero, la falla en la actividad de un herbicida proviene, a veces, de la resistencia de la especie de maleza tratada y, muchas veces, de otras causas.
- Segundo, se confirma que el problema es, efectivamente, un caso de resistencia al herbicida.
- Tercero, se definen las acciones que se seguirán cuando se confirme la resistencia al herbicida.
- Cuarto, se sugieren pautas para evitar o reducir el riesgo de aparición de la resistencia a los herbicidas.

Cuadro 5. Algunos parámetros de varios herbicidas usados en arroz.

Herbicida	Tipo de molécula	Movilidad en el suelo	Vida media en suelo[a] (días)	T½ del metabolismo en planta[b] (días)	K_{oc}[c] (ml/g)	log K_{ow}	Solubilidad en agua (mg/l)	pKa
Glufosinato de amonio	Ionizable Zwitterion	Poco móvil a inmóvil	De 3 a 9 Muy poco persistente	1.4	800	*ca* – 3.0 (forma no ionizada)	> 10,000	Varios valores
Glifosato	Ionizable Zwitterion	Inmóvil	De 3 a 60 Moderada-mente persistente	8.2	10,000	*ca* – 4.0 (forma no ionizada)	12,000	Varios valores
Paraquat	Ionizable Dicatión	Inmóvil	1000 Altamente persistente	200	100,000	2.2 (forma no ionizada)	1,000,000	_
Propanil	No iónico	Altamente móvil a moderada-mente móvil	De 1 a 4 Muy poco persistente	0.8	79	2.8	130	_
Metsulfuron-metil	Ionizable Ácido	Altamente móvil a muy móvil	7-190 Moderada-mente persistente	12	pseudo K_{oc}: 2.0	1.64 (forma no ionizada)	Variable, según el pH: - a 25 °C y a pH 4.6, 270 mg/l; - a 25 °C y a pH 9, 213,000 mg/l	3.64

(Continúa)

Cuadro 5. (Continuación.)

Herbicida	Tipo de molécula	Movilidad en el suelo	Vida media en suelo[a] (días)	T½ del metabolismo en planta[b] (días)	K_{oc}[c] (ml/g)	log K_{ow}	Solubilidad en agua (mg/l)	pKa
Oxadiazón	No iónico	Poco móvil a inmóvil	60-180 Muy persistente	18	864	4.8	0.7	_
Pendimetalina	No iónico	Poco móvil a inmóvil	30-273 Muy persistente	18	2861	5.18	0.3	_
Clomazone	No iónico	Altamente móvil a moderada-mente móvil	10-137 Moderada-mente persistente	4.8	79	2.54	1100	_

a. Los valores de vida media en el suelo son promedios de varios tipos de suelos y diferentes condiciones de suelo.
b. T½ metabolismo = vida media del metabolismo del compuesto en la planta.
c. Los valores de K_{oc} están dados para un suelo con 1.72% de materia orgánica y 1.02% de carbono orgánico.

Control deficiente

El procedimiento para analizar el control deficiente o irregular que hace un herbicida de una o varias malezas comprende los pasos siguientes:

Investigar causas posibles de la falla

- ¿Se aplicó la dosis correcta del herbicida?
- ¿Se usó el surfactante recomendado?
- ¿Se aplicó correctamente el herbicida? ¿El equipo de aplicación y las boquillas estaban en buen estado? ¿Se calibró apropiadamente el equipo? ¿Se usó el volumen de agua recomendado para la mezcla?
- ¿El estado de desarrollo de la maleza al momento de la aplicación era el adecuado?
- ¿Había condiciones ambientales adversas cuando se hizo la aplicación?
- ¿El control deficiente ha ocurrido en todo el arrozal?

Examinar casos sospechosos de resistencia

- ¿Existe una historia de uso de herbicidas en el lote o predio estudiado y es posible examinarla?
- ¿Se han aplicado durante años herbicidas que tengan el mismo mecanismo de acción?
- ¿Se han reportado casos de resistencia a algunos herbicidas en los campos o predios adyacentes al que se estudia?
- ¿La maleza que ocasiona el problema actual era controlada eficazmente, en años anteriores, por el herbicida cuya actividad biológica parece haber decrecido?
- En los últimos años o ciclos de cultivo, ¿se ha notado un descenso en el control de la maleza que causa el problema?
- ¿El herbicida (o los herbicidas) que se usa comúnmente en el lote o predio estudiado controla bien especies de malezas sensibles a él, excepto la maleza que causa el problema?

Verificar el caso de resistencia

- Comunicar su sospecha al técnico de la compañía que produce o distribuye el herbicida.
- Comprobar, mediante experimentos, la presencia de la resistencia y el grado en que se manifiesta. Una prueba muy sencilla consiste en demarcar parcelas de arroz y asperjarlas con el herbicida sospechoso de haber perdido efectividad; se ensayan dosis variables del producto, que son generalmente 0X (el testigo sin tratar), 1X, 2X, 3X, 4X y 5X; donde X es la dosis estándar de uso.

Comprobada la resistencia, estudiar el manejo del biotipo resistente

- Un biotipo de maleza resistente a un herbicida no debe causar pánico: los diferentes casos de esta resistencia han sido manejados eficazmente.
- Aplicar la estrategia de manejo de malezas resistentes (ver más abajo) y comunicarse inmediatamente con un representante de la compañía productora o distribuidora.

Estrategias para reducir el riesgo de aparición de la resistencia

- Minimizar la *presión de selección* que ejercen los herbicidas específicos, es decir, no usar cosecha tras cosecha, durante varios años, un mismo herbicida.
- Evitar el *uso continuado* de herbicidas que tengan el mismo sitio de acción, o sea, el mismo mecanismo de acción. Por ello, la rotación de cultivos,

acompañada de una rotación de herbicidas cuyo mecanismo de acción sea diferente, es una práctica altamente recomendable.
- Reducir, hasta donde sea posible, el uso de herbicidas (ya sea en mezclas o en aplicaciones continuadas) que actúen en el *mismo sitio de acción* durante un mismo ciclo de cultivo.
- Aplicar en presiembra herbicidas no selectivos y no residuales, así como herbicidas preemergentes de amplio espectro, para *controlar a tiempo* los biotipos resistentes de malezas.
- Emplear prácticas de control *mecánicas y físicas*.
- Sembrar *semilla certificada*, que esté libre de semillas de malezas.

Estrategias para manejar las malezas resistentes

- *Identificar rápidamente* la población resistente y el grado de resistencia. Como se indicó anteriormente, las acciones pertinentes son:
  - reconocer sin demora los 'parches' o brotes de una población resistente de malezas;
  - recolectar semilla de las plantas resistentes y acudir a una institución de investigación o universidad.
- Poner en *cuarentena* los parches o lotes que tengan el biotipo resistente.
- Hacer un *control manual inmediato* de los parches del biotipo resistente, con el fin de evitar que produzca semilla y la disperse y que ésta se incorpore luego al banco de semillas del suelo.
- Evitar la *polinización* o la producción de semilla del biotipo resistente; si la maleza resistente es autógama, no permitir que semille; si es una especie alógama, impedir que libere el polen.
- Sembrar variedades de arroz y cultivos de rotación que *compitan* bien con las malezas.
- No *volver a aplicar* herbicidas a poblaciones de malezas que tengan resistencia múltiple o resistencia cruzada a estos productos.
- Mezclar *varios herbicidas*; esta opción es acertada, en especial si las malezas resistentes son especies autógamas porque en ellas es raro hallar mutaciones múltiples y el flujo de genes es bajo.
- Considerar el *mecanismo de acción* de los herbicidas cuando diseñe la rotación de cultivos y herbicidas, así como las mezclas que haga de estos compuestos.
- Quemar los *residuos* de las cosechas.
- Establecer normas estrictas para evitar la *contaminación* del grano cosechado, de los implementos de labranza y de la maquinaria agrícola.
- Aplicar en *presiembra* herbicidas que no sean selectivos ni residuales (por ejemplo, glifosato, glufosinato de amonio, paraquat), es decir, herbicidas de aplicación temprana y de *amplio espectro*.
- Tener presente que, aunque aparezca un biotipo de maleza resistente en un campo, el *agricultor* no cambiará de sistema de cultivo (ya sea de secano o con riego).
- Considerar, finalmente, en la estrategia de manejo de las malezas la rotación de cultivos y de herbicidas, y los métodos de control mecánicos y físicos.

El diagrama de flujo de la Figura 3 contiene los pasos que deben seguirse para afrontar la resistencia de las malezas a los herbicidas.

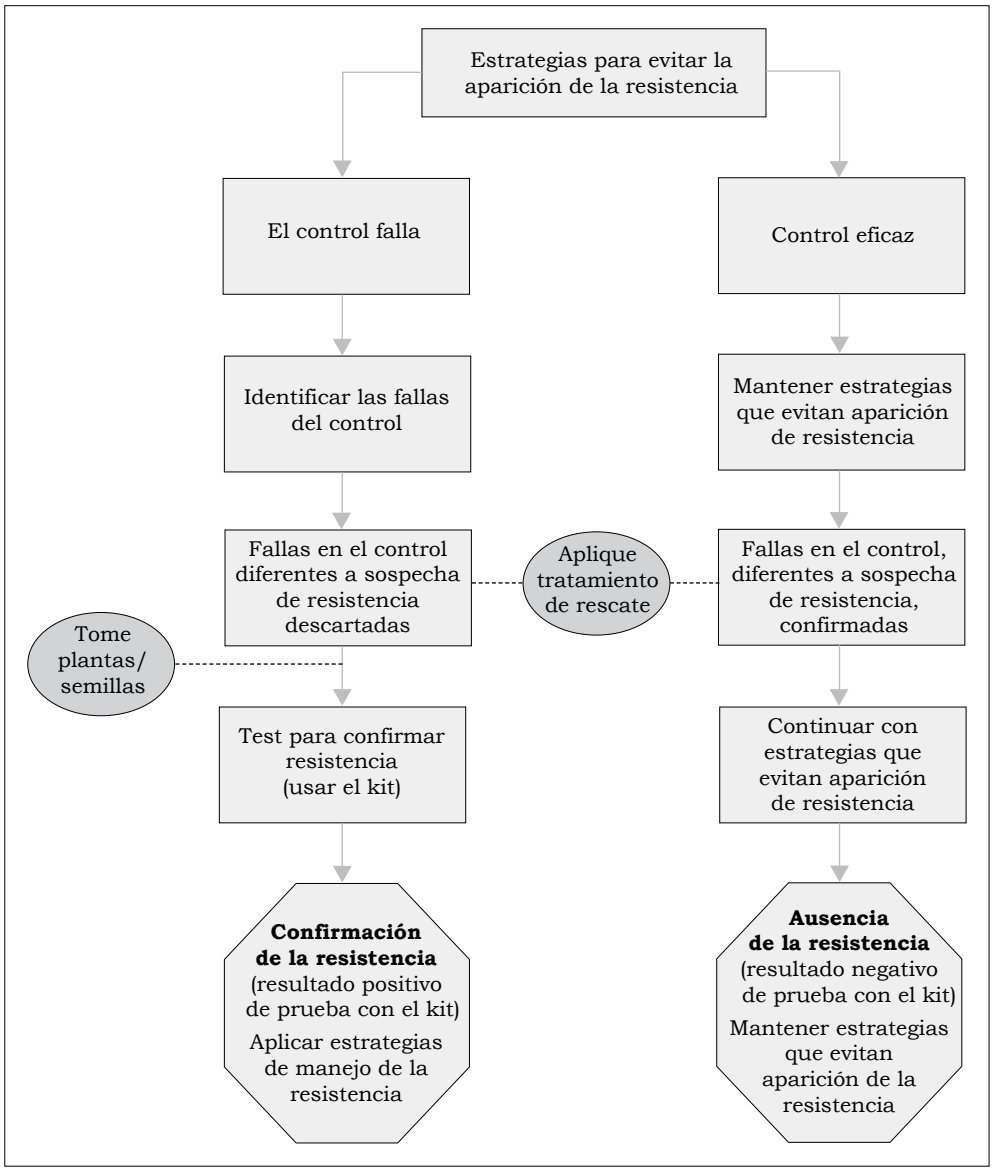


Figura 3. Diagrama de flujo de las acciones que conviene tomar para manejar la resistencia de una población de malezas al herbicida que convencionalmente se aplicaba a esa maleza. (Adaptada de HRAC, 2009.)

Referencias bibliográficas

Agricultura de las Américas. 2007. Cultivo del arroz en Colombia. Edición 370. Medios & Medios, Bogotá, Colombia. p. 9-14.

Ampong-Nyarko, K.; de Datta, S.K. 1991. A handbook for weed control in rice. International Rice Research Institute (IRRI), Manila, Filipinas. 113 p.

Barnard, K.; Bell, M. 1998. Weed management in rice [en línea]. [citado abril 2009]. Disponible en: www.rdi.ku.ac.th

Cardina, J.; Webster, T.M.; Herms, C.P.; Regnier, E.E. 1999. Development of weed IPM: Levels of integration for weed management. In: Buhler, D.D. (ed.). Expanding the context of weed management. Food Products Press, Nueva York. p. 239-267.

Fedearroz (Federación de Arroceros de Colombia). 2008. Estadísticas arroceras: Series históricas, precios, costos [en línea]. [citado abril 2009]. Disponible en: www.fedearroz.com.co

Green Facts: Hechos sobre la salud y el medio ambiente. 2007. [en línea]. [citado julio 2008]. Disponible en: www.greenfacts.org/es/glosario/abc/biomagnificacion.htm

HRAC (Herbicide Resistance Action Committee). 2009. Manejo de la resistencia a los herbicidas. [en línea]. [citado febrero 2009]. Disponible en: www.hracglobal.com

Johnson, D.E. 1996. Manejo de malezas en la producción de arroz de pequeños propietarios en los trópicos [en línea]. [citado julio 2008]. Disponible en: www.ipmworld.umn.edu/chapters//johnson.htm

Joseph plains weed management area; Idaho County. 2004. [en línea]. [citado marzo 2006]. Disponible en: www.idahocounty.org

Kropff, M.J.; Lotz, L.A.P. 1993. Empirical models for crop-weed competition. In: Kropff, M.J.; van Laar, H.H. (eds.). Modeling crop-weed interactions. CAB International, Wallingford, Reino Unido. p. 1-24.

Kropff, M.J.; Weaver, S.E.; Lotz, L.A.P.; Lindquist, J.L.; Joenje, W.; Schnieders, B.I.; van Keulen, N.C.; Migo, T.R.; Fajardo, F.F. 1993. Understanding crop-weed interaction in field situations. In: Kropff, M.J.; van Laar, H.H. (eds.). Modeling crop-weed interactions. CAB International, Wallingford, Reino Unido. p. 105-136.

Labrada, R. 2003. The need for improved weed management in rice [en línea]. In: van Tran, D. (ed.). Sustainable rice production for food security. Memorias de la 20a. Reunión de la International Rice Commission, celebrada en Bangkok, Tailandia, del 23 al 26 de julio de 2002. 306 p. [citado julio 2008]. Disponible en: www.fao.org/docrep/006/y4751e/y4751e0l.htm

Lin, W.; He, H.Q.; Shen, L.; Chen, X.; Ke, Y.; Guo, Y.; He, H.B. 2004. A proteomic approach to analysing rice allelopathy on barnyard grass (*Echinochloa crus-galli* L.) [en línea]. [citado julio 2006]. Disponible en: www.cropscience.org.au/icsc2004/

Ministerio del Trabajo y Asuntos Sociales de España e Instituto Nacional de Higiene en el Trabajo. 2009. NTP 108: Criterios toxicológicos generales para los contaminantes químicos. [en línea]. [citado octubre 2009]. Disponible en: www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/FichasTecnicas/NTP/Ficheros/101a200/ntp_108.pdf

New Agriculturist. 2009. Direct approach to weeds in rice [en línea]. [citado octubre 2009]. Disponible en: www.new-ag.info/04-2/focuson/focuson2.html

Olofsdotter, M. (ed.). 1998. Allelopathy in rice. International Rice Research Institute (IRRI), Los Baños, Filipinas. 154 p.

Puentes, B. 1999. Una visión integral del manejo de malezas en arroz. In: Memorias del Primer Seminario Técnico de Investigaciones sobre el Cultivo del Arroz en el Caribe Húmedo, Facultad de Ciencias Agrícolas, Universidad de Córdoba, Montería, julio de 1999. Fedearroz, Montería, Colombia. p. 27-31.

Quintero, L.E.; Acevedo, X.; Salazar, M. 2004. Costos de producción de arroz en Colombia [en línea]. Observatorio Agrocadenas Colombia, Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural. 26 p. [citado noviembre 2006]. Disponible en: www.agrocadenas.gov.co/documentos/Costos/No41_costosarroz.pdf

Rainbolt, C. 2006. Weed management in rice-2006 [en línea]. University of Florida, IFAS Extension. [citado julio 2008]. Disponible en: www.edis.ifas.uftl.edu

Sampietro, D. [s.f.]. Alelopatía: Concepto, características, metodología de estudio e importancia [en línea]. Cátedra de Fitoquímica, Instituto de Estudios Vegetales "Dr. Antonio R. Sampietro", Tucumán, Argentina. [citado julio 2008]. Disponible en: www.biologia.edu.ar/plantas/alelopatia.htm

Sathyamoorthy, N.K.; Mahendran, S.; Babu, R.; Ragavan, T. 2004. Effect of integrated weed management practices on total weed dry weight, nutrient removal of weeds in rice: Rice wet seeded system. Journal of Agronomy 3(4):263-267.

Smith, N. 1994. Biological controls as components of integrated weed management for rice in the United States [en línea]. [citado febrero 2009]. Disponible en: www.fftc.agnet.org

Weed management: Clean fields sustain. 2003. [en línea]. IRRI (International Rice Research Institute). [citado abril 2009]. Disponible en: www.irri.org

Capítulo 22

Arroz rojo en Colombia: Comportamiento y riesgos

Jairo Clavijo
Fabio Montealegre

Contenido

	Página
Resumen	413
Abstract	414
Introducción	414
Investigación	415
Tipos de arroz rojo	415
Grupo 'varietales'	416
Grupo 'pipones'	416
Grupo 'mechudos'	417
Grupo 'rayones'	417
Comportamiento de la semilla	417
Banco de semillas	417
Latencia de la semilla	419
Ensayos de ruptura de latencia	419
Monocultivo continuo	421
Riesgo de infestacion	421
Riesgo ambiental	422
Competencia temprana	423
Interferencia con el cultivo	424
Habilidad competitiva	428
Manejo del problema	428
Referencias bibliográficas	429

Resumen

Se describen los tipos de arroz rojo (*Oryza sativa* L.) presentes en los arrozales de Colombia, su comportamiento, las principales prácticas que contribuyen a su diseminación, y se proponen algunas medidas de control. El arroz rojo es, en muchos países, una de las malezas más agresivas del arroz cultivado porque reduce su rendimiento, desmejora la calidad de su grano y aumenta los costos de su producción. Según estudios realizados con este tipo de arroz, algunas de las prácticas que favorecen su diseminación incluyen: el monocultivo, la siembra de semilla no certificada, el uso de maquinaria contaminada con semillas de la maleza, y el manejo inadecuado que se le da por el desconocimiento de su biología y de su comportamiento. En algunos países como Colombia, otros factores que

agravan el problema del arroz rojo tienen que ver con el tamaño de las unidades productoras de arroz (en su mayoría < 10 ha), la administración de la tierra, que está en manos de arrendatarios preocupados únicamente por la cosecha, y la deficiente asistencia técnica profesional (> 50% de las unidades productoras sin manejo profesional).

Abstract

Red rice in Colombia: Performance and risks

The types of red rice (*Oryza sativa* L.) found in rice fields in Colombia are described, as well as their performance and the main practices contributing to their dissemination. Several control measures are proposed. In many countries red rice is one of the most aggressive weeds affecting cultivated rice, causing significant yield losses, affecting grain quality, and increasing production costs. Studies conducted on this type of rice indicate that several practices promoting its dissemination include monocropping, planting of noncertified seed, use of machinery contaminated with the weed's seed, and inadequate management due to lack of understanding of red rice biology and performance. In several countries, such as Colombia, other factors escalate the problem of red rice: the size of rice fields (most < 10 ha), soil management practices applied by land tenants who are only concerned about their harvest, and deficient professional and technical assistance (> 50% of the rice fields are managed without professional assistance).

Introducción

Dos especies de arroz se cultivan actualmente: *Oryza sativa* L., de origen asiático, y *Oryza glaberrima* Steud., de origen africano. La primera, cuyas variedades son muy adaptables y es más aceptada por los cultivadores, se ha expandido por el cinturón tropical y subtropical del planeta; su cariópside es de color blanco. La segunda, cuya cariópside es de color rojizo, ha sido menos aceptada que *O. sativa* y se ha dispersado solamente alrededor de su lugar de origen (Angladette, 1969).

El nombre de 'arroz rojo' se aplica a varios biotipos de la especie *Oryza sativa* que se consideran maleza en el cultivo del arroz comercial en todo el mundo porque exhiben tres características indeseables: sus granos tienen el pericarpio de un color entre rojizo y marrón, se desgranan de las panículas fácilmente y presentan ciclos de latencia ('dormancia'). El arroz rojo es entonces una gramínea anual de plantas autógamas con cleistogamia, que crecen rápidamente, en especial durante los primeros 40 días después de emergidas, y llegan a experimentar de 1% a 3% de polinización cruzada.

No se han encontrado diferencias microscópicas entre los tejidos de las semillas y de las hojas del arroz rojo y de las variedades de arroz común o comercial; hay, sin embargo, dos *diferencias macroscópicas*: las plantas de arroz rojo tienden a ser más altas y a tener más macollas que las de arroz común. Varios biotipos de arroz rojo han sido reportados en el mundo y se cree que hay hibridación natural entre éstos y el arroz común. En Colombia, por ejemplo, hay de 18 a 20 biotipos, algunos catalogados como varietales porque sus características son muy similares a las de las variedades que más se siembran en el país.

Se aceptó, desde 1846, que el arroz rojo era, en Estados Unidos, una maleza agresiva del arroz cultivado que le causa

pérdidas severas en rendimiento y en calidad; por ejemplo, en los Estados de Louisiana, Arkansas y Mississippi era la maleza más indeseable de todas. Se ha reportado también el arroz rojo como problema grave en Brasil, Guyana, Venezuela, Italia y el oeste de la India, donde se practica la siembra directa del arroz (Clavijo, 1987). Los campos de arroz de Colombia se encuentran hoy seriamente afectados por las poblaciones de esta maleza, que han causado, a veces, una reducción del rendimiento de 57%.

¿Cuáles son las *causas* de este problema? Aplicadas en conjunto o por separado (según la cultura arrocera de la zona), las siguientes prácticas contribuyen a la diseminación del arroz rojo:

- El monocultivo (el arroz no se asocia ni se intercala).
- La siembra de semilla no certificada.
- Las operaciones hechas con maquinaria contaminada con semillas de la maleza.
- El pésimo manejo que se da a esta maleza porque se desconocen su biología y su comportamiento.

En algunos países, como Colombia, otros factores de gestión de la actividad arrocera agravan el problema del arroz rojo, y de las malezas en general, en el cultivo de arroz; son los siguientes:

- El tamaño de las unidades productoras de arroz, que no llegan, en su mayoría, a las 10 ha.
- La administración de la tierra, que está en manos de arrendatarios (preocupados solamente por sacar su cosecha de grano).
- La libre contratación de la asistencia técnica, que deja un 52% de las unidades productoras de arroz sin manejo profesional.

Investigación

Varias instituciones, universidades y empresas han apoyado, ya sea en el aspecto económico, en el científico o en el logístico, la investigación que se ha hecho sobre el arroz rojo, tanto en estudios básicos como en prácticas agronómicas, en control químico, y en la siembra de otros cultivos semestrales (rotación de cultivos). En la granja experimental de Fedearroz conocida como La Joya, en Saldaña, Tolima, se llevaron a cabo estudios básicos y agronómicos del arroz rojo en las siguientes áreas: clasificación, caracterización morfo-fisiológica, análisis de competencia, latencia ('dormancia') de las semillas, y variabilidad genética.

Entre los *efectos negativos* del arroz rojo se cuentan los siguientes: reduce el rendimiento del arroz común (o 'blanco'), deteriora la calidad del grano, aumenta los costos de producción, desvaloriza la tierra, afecta la molinería del arroz, se acumula como banco de semillas en el suelo, y crea una mayor probabilidad de cruzamientos indeseados.

Tipos de arroz rojo

Para poder describir los principales tipos de arroz rojo de Colombia, Montealegre y Clavijo (1991b) llevaron a cabo un estudio en el distrito de riego UsoSaldaña, que condujo a su clasificación. El estudio consistió en recolectar a mano, directamente en el campo, la semilla de las plantas de arroz consideradas diferentes del arroz común. Se le asignó un nombre a cada tipo diferente de arroz rojo partiendo de los caracteres fenotípicos de la espiguilla, y luego se clasificaron los tipos en cuatro grupos denominados así: varietales, pipones, mechudos y rayones. Se seleccionaron 15 de estos tipos de arroz rojo y se sembraron en el campo para obtener tres datos de sus plantas: la

descripción de sus características, la duración de algunas de sus etapas de desarrollo y el registro de los caracteres fenotípicos de la espiguilla (Cuadro 1).

Grupo 'varietales'

Sus semillas tienen forma semejante a la de algunas variedades cultivadas de arroz común y provienen, posiblemente, de hibridación entre el arroz rojo y las variedades comerciales. Por su similitud con la variedad progenitora, el arroz rojo de este grupo es el más difícil de diferenciar en los análisis de calidad del arroz 'paddy' (arroz con cáscara); dan lugar, por ello, a muchos rechazos de muestras de semilla certificada en los laboratorios (Montealegre y Clavijo, 1991b).

En este grupo se encontró la mayor variabilidad genética: se sembraron inicialmente 13 biotipos y se obtuvieron 42, de los cuales se seleccionaron 25. La segregación fue similar en las siembras segunda y tercera, y se llegó a obtener 109 materiales, de los cuales se seleccionaron 39; con éstos se hicieron seis siembras hasta observar una estabilidad genética más alta que permitió caracterizar algunos biotipos.

Grupo 'pipones'

Su grano puede ser corto, intermedio o largo, es ancho y tiene un ligero abultamiento en la parte media: por esta característica se denominan comúnmente pipones. Sus glumas son de color pajizo y su porcentaje de desgrane es

Cuadro 1. Características del arroz rojo según los grupos en que se ha clasificado en Colombia.

Grupo	Tipo	Color de:		Altura de planta (cm)	Tipo de panícula	Forma de la planta	Ciclo de vida (días)
		Glumas	Peri-carpio				
Varietales	Varietal C-4	Pajizo	Rojo	94.2	Compacta	Abierta	100
	Varietal C-6	Pajizo	Rojo	112.3	Abierta	Abierta	98
	Varietal C-9	Pajizo	Rojo	102.2	Abierta	Compacta	109
	Desgranador	Dorado	Blanco	103.5	Abierta	Abierta	110
Pipones	Desgranador, PD	Pajizo	Rojo	109.8	Abierta	Abierta	112
	Japónico	Pajizo	Rojo	117.7	Compacta	Compacta	110
	Punto rojo	Pajizo	Rojo	94.5	Abierta	Normal	100
	Vela	Pajizo	Rojo	94.3	Compacta	Compacta	110
Mechudos	Patechulo, MP	Negro	Marrón	110.0	Intermedia	Abierta	105
	Dorado rayón	Dorado Marrón	Rojo	96.7	Compacta	Compacta	116
	Pajacafé	Pajizo Marrón	Marrón	142.2	Abierta	Abierta	95
	Pajalimpia	Pajizo	Rojo	113.8	Abierta	Abierta	104
	Punto morado	Pajizo	Rojo	114.0	Abierta	Abierta	105
Rayones	Tigre	Negro dorado	Marrón	119.2	Abierta	Normal	100
	Manchado	Marrón	Marrón	97.8	Abierta	Abierta	100

ligeramente superior al de los otros tres grupos de arroz rojo (Montealegre y Clavijo, 1991b). Presentan una larga 'dormancia' de las semillas (de 55 a 70 días) y tienen buena estabilidad genética, características que lo hacen un competidor eficiente en un cultivo comercial.

Grupo 'mechudos'

Su característica principal es una arista muy larga en el grano, que es largo y aplanado. Las glumas del grano son de colores diferentes que varían entre el negro, el marrón y el pajizo (Montealegre y Clavijo, 1991b). Los cinco biotipos del Cuadro 1 tienen 0% de segregación y son competidores eficientes.

Grupo 'rayones'

Se caracteriza porque las glumas del grano tienen dos colores, uno de ellos como un moteado, y porque las espiguillas no son aristadas. Comprende dos tipos de arroz rojo de características muy similares pero de comportamiento fisiológico diferente (Montealegre y Clavijo, 1991b).

En el Cuadro 1 aparecen, además de las mencionadas, otras características de cada uno de los 15 tipos de arroz rojo clasificados. Es posible que haya hoy en el campo más tipos del grupo varietal y quizás otros biotipos regionales. Sin embargo, la experiencia indica que, actualmente en Colombia, Pipón desgranador (PD) y Mechudo patechulo (MP) son los tipos de arroz rojo más frecuentes en todos los distritos de riego y zonas arroceras del país.

Montealegre (2004) analizó luego la variabilidad genética del arroz rojo en los cultivos de arroz comercial y encontró nuevos biotipos de alta estabilidad genética que superaban a los de baja estabilidad genética en permanencia y agresividad en el campo y como fuertes competidores.

Comportamiento de la semilla

La capacidad de desgrane de la mayoría de los biotipos de arroz rojo permite a las plantas que escapan al control en el campo renovar el banco de semillas del suelo; éste contendrá entonces tres clases de semillas de arroz rojo:

- Las semillas que permanecen en la superficie y germinan rápidamente.
- Las semillas que son enterradas y permanecen allí latentes.
- Las semillas que son enterradas y desenterradas en ciclos de cultivo sucesivos, y sólo germinan en respuesta a un estímulo ambiental específico.

Banco de semillas

Se han llevado a cabo varios trabajos para estudiar las condiciones en que se encuentra la semilla de arroz rojo en el banco de semillas del suelo.

- **Saldaña 1.** En un trabajo realizado por Venegas y Clavijo [1999] en los campos de arroz de Saldaña (Tolima), en Colombia, se sondeó el *banco de semillas* de arroz rojo y se calcularon, para los primeros 10 cm del perfil del suelo, 2,318,000 semillas viables por hectárea; su mayor concentración se registró en la parte baja de los lotes cultivados (Cuadro 2).

  El resultado indica que la cantidad de semillas de arroz rojo presentes en el perfil del suelo no depende del tamaño del lote sino de las prácticas de cultivo aplicadas cosecha tras cosecha. Se puede afirmar que, en general, la preparación del terreno con rastras y rastrillos, que no profundizan más de 12 cm en el

Cuadro 2. Semillas de arroz rojo viables encontradas a diferente profundidad y en dos franjas distintas del terreno en algunos cultivos de arroz común en Saldaña, Colombia.

Profundidad (cm)	Semillas de arroz rojo (no./m^2) en franja del cultivo		
	Alta	Baja	Promedio
0 – 5	92.5	165.4	128.9 a
5 – 10	56.7	148.9	102.8 a
10 – 15	18.9	66.1	42.5 b
15 – 20	2.3	33.0	17.7 c
Promedio	42.6 b	103.4 a	

a, b y c indican niveles de significancia según la prueba de Duncan.

suelo, contribuye a que la concentración de semillas de arroz rojo se eleve en los primeros 10 cm del perfil del suelo.

- **Tolima y Huila.** Se hizo otro estudio (Clavijo et al., 2000) para evaluar la acción de ciertas *labores agronómicas* como medios de infestación del banco de semillas del suelo con semillas de arroz rojo, y en él se sondearon, a 5 cm de profundidad, algunos lotes sembrados con arroz común en las localidades de El Espinal (Tolima) y de Campoalegre (Huila), en Colombia. Los resultados (Cuadro 3) demuestran que la preparación del terreno lleva a la superficie del suelo cierta cantidad de semillas de arroz rojo que tienen posibilidades de germinar (como ocurrió en Campoalegre). Se comprobó además que, según el éxito de las prácticas de manejo de las malezas (en especial, del arroz rojo) que se hagan después de la preparación del terreno, habrá una cantidad mayor o menor de semillas de arroz rojo en el banco de semillas del suelo al terminar la cosecha. Si hay fallas en ese manejo, aparecerán plantas de arroz rojo en los lotes de arroz comercial, que producirán semilla antes de la cosecha (o durante ella) y reinfestarán el suelo.

  La *preparación del terreno* inmediatamente después de la cosecha del arroz comercial reinfesta el suelo con la semilla de arroz rojo desgranada, la cual puede permanecer viable durante muchos años en el suelo y germinar cuando las condiciones ambientales le sean favorables (Baker y Sonnier, 1983).

Se ha reportado que, en un suelo seco, las semillas de varios biotipos de arroz rojo muestran una gran viabilidad después de 3 años, mientras que las de arroz comercial perdieron viabilidad al cabo del primer año. Además, las semillas de arroz rojo y de arroz comercial permanecieron vivas durante

Cuadro 3. Semillas de arroz rojo en el banco de semillas del suelo, en dos localidades y en tres épocas del cultivo.

Época	Semillas de arroz rojo (no./m^2) en:	
	El Espinal	Campoalegre
Antes de la preparación del terreno	45.0 ab	12.5 b
Después de la preparación del terreno	5.5 a	55.0 a
Después de la cosecha	20.0 b	62.5 a

a, b y c indican niveles de significancia según la prueba de Duncan.

un tiempo más largo en las parcelas de arroz irrigadas que en las no irrigadas (Clavijo, 1987).

- **Saldaña 2.** En este ensayo realizado en Saldaña (Tolima) se comprobó además la *inducción de latencia* (o 'dormancia', del inglés 'dormancy') en el biotipo Pipón desgranador, PD (Montealegre y Clavijo, 1994). Semillas de la variedad Oryzica 1 y de los biotipos de arroz rojo 'Mechudo patechulo', 'Varietal C-6' y 'Pipón desgranador' fueron enterradas a profundidades de 5, 15 y 25 cm, y desenterradas (cada tratamiento de genotipo + profundidad) a los 3, 5 y 7 meses. La germinación a través del tiempo indicó que, en promedio, la profundidad de entierro (o de 'siembra') había inducido 12%, 47% y 41% de latencia en las semillas de Pipón desgranador enterradas, respectivamente, a 5, 15 y 25 cm de profundidad (Cuadro 4). Es probable que los cambios en la germinación y en la latencia de las semillas del biotipo PD ocurran, al enterrarlas, como un efecto de la menor intensidad de luz a mayor profundidad en el suelo, y que se presenten por ello ciclos de latencia (o dormancia) y una foto-dependencia controlada por el fitocromo.

Una conclusión de este ensayo es la siguiente: la preparación del suelo no debe hacerse sino pasados 50 días después de la cosecha, dando así tiempo a que mueran desecadas o germinen las semillas superficiales. De este modo no se entierran más profundamente (con el laboreo) las semillas de PD recién caídas, evitando así que se incremente el número de las latentes y que más tarde (semanas o meses después) sea muy difícil su manejo cuando germinen y las plantas crezcan y produzcan semilla.

Latencia de la semilla

La latencia (o 'dormancia') de las semillas de arroz rojo ha sido uno de los factores que han contribuido a la infestación de los campos de arroz de Colombia con esta maleza. Cohn y Hughes (1981) hicieron estudios sobre los mecanismos fisiológicos de esta característica. Sugieren que la estructura y la función de las membranas de la semilla tienen un papel en la terminación de la latencia. Se halló además que la latencia de semillas almacenadas con aire en condiciones normales, simulando un desgrane retardado, terminó más rápidamente que la de semillas desgranadas tempranamente y mantenidas en contacto con el suelo.

Ensayos de ruptura de latencia

Alba y Clavijo (2006) llevaron a cabo un ensayo de *precalentamiento* de las semillas de dos biotipos importantes de

Cuadro 4. Efecto de la profundidad y del tiempo de entierro en la germinación de las semillas de diferentes genotipos de arroz (uno comercial y tres de arroz rojo).

Arroz rojo o variedad	Germinación (%) con profundidad de entierro (siembra) de:		
	5 cm	15 cm	25 cm
Oryzica 1	98.3 a	97.4 ab	97.4 ab
Mechudo patechulo	99.2 a	95.0 abc	96.8 abc
Varietal C-6	97.2 ab	93.7 bc	92.5 c
Pipón desgranador	84.0 d	50.9 f	56.1 e

a, b,...f indican niveles de significancia según la prueba de Duncan.

arroz rojo, MP y PD, en seco y a 30 °C durante 4 semanas, con el fin de romper su latencia. Se observó lo siguiente (Cuadro 5):

- Con el transcurso de las semanas, los biotipos perdían su latencia y, a la cuarta semana, su porcentaje de germinación era el doble del que presentaba el testigo absoluto.
- Se evaluó la velocidad de germinación (porcentaje de semillas germinadas por día), y se halló que las semillas de MP aumentaban paulatinamente esa velocidad a partir de la segunda semana del ensayo, mientras que las de PD lo hacían abruptamente.

Las semillas de arroz rojo, con cáscara o sin ella, eran latentes al momento de la cosecha (Cohn y Hughes, 1981) pero, al ser almacenadas durante 4 semanas a 30 °C, rompían esa latencia y presentaban porcentajes de germinación mayores que 90%. Una conclusión de este ensayo fue que la liberación de la latencia dependía del tiempo en que la semilla era expuesta a esa temperatura durante la poscosecha.

En otro experimento, las semillas latentes de dos biotipos de arroz rojo fueron sometidas a *escarificación química* con ácido sulfúrico (diferentes concentraciones) y a escarificación mecánica por remoción manual de la lemma y de la pálea (Cuadro 6). Se observó lo siguiente:

- Las semillas de ambos biotipos a las que se removieron manualmente las envolturas externas lograron porcentajes de germinación mayores que 90%.
- Cuando a esas semillas se les lijó, además, el endospermo, sus porcentajes de germinación fueron de 96% para el biotipo MP y de 98% para el PD.

Estos resultados señalan claramente que la testa de la semilla impone una restricción al intercambio gaseoso de ésta y que, una vez retirada, la germinación procede en forma normal (Clavijo et al., 2000). Roberts (1961) trabajó con semillas de arroz común y encontró que las estructuras externas de la semilla actuaban como una barrera a la entrada

Cuadro 5. Aspectos de la germinación de las semillas de dos biotipos de arroz rojo en respuesta al precalentamiento (30 °C) a que se sometieron para romper su latencia.

Biotipo de arroz rojo	Duración tratamiento (semanas)	Germinación (%)	Velocidad de germinación (%/día)	Radícula (cm)
Mechudo patechulo, MP	0	42	20.1	4.5
	1	53	20.0	4.7
	2	74	20.6	5.2
	3	78	22.3	4.9
	4	82	23.0	5.1
Pipón desgranador, PD	0	41	17.6	3.2
	1	50	21.6	4.7
	2	88	22.7	5.5
	3	90	25.1	4.9
	4	91	24.1	4.9

Cuadro 6. Porcentaje de germinación de las semillas de dos biotipos de arroz rojo, MP y PD, en respuesta a su escarificación por métodos mecánicos y químicos

Tratamiento	Lemma y pálea	Método escarificador	Germinación de MP (%)	Germinación de PD (%)
1	Presentes	H_2SO_4 al 1%	27	58
2	Presentes	H_2SO_4 al 5%	27	47
3	Presentes	Punción	31	43
4	Presentes	Lijamiento	21	43
5	Ausentes	H_2SO_4 al 1%	93	92
6	Ausentes	H_2SO_4 al 5%	91	87
7	Ausentes	Punción	96	92
8	Ausentes	Lijamiento	96	98
9	Testigo (lemma y pálea presentes)	—	22	33

de oxígeno o a la salida de algún inhibidor (en estado gaseoso), lo que corrobora los resultados anteriores.

Resultado
En conclusión, la latencia de las semillas de los biotipos de arroz rojo estaría regida por la permeabilidad de las envolturas externas de la semilla (y de otras membranas que la recubren) al paso del oxígeno (hacia adentro) o de cualquier otro iniciador de rutas metabólicas (hacia adentro) o inhibidor de ellas (hacia afuera).

La aplicación práctica de este resultado sería la siguiente: cuando las semillas de arroz rojo quedan expuestas sobre el suelo seco (antes o después de la cosecha) a una temperatura alta, durante varias semanas, esa exposición favorece mucho su germinación una vez se hayan hecho los primeros mojes del terreno.

Monocultivo continuo

El monocultivo continuo del arroz está expuesto a dos riesgos serios: la infestación de los lotes con arroz rojo y los efectos ambientales adversos debidos a la falta de rotación de cultivos y a las condiciones socioeconómicas de los cultivadores.

Riesgo de infestación

Cuando se siembra continuamente arroz en una zona cuyo suelo no recibe una preparación especial, la dinámica de la población del arroz rojo se intensifica. La empresa de investigaciones agrícolas (INFAMS) del Tolima, Colombia, llevó a cabo tres nuevos ensayos para valorar esa dinámica: dos en Saldaña (suelos franco-arcillosos) y uno en El Espinal (suelo franco-areno-arcilloso). Se empleó la siguiente metodología:

- **Ruptura de latencia.** Mantener el terreno sin remover ni preparar en los 50 días que siguen a la recolección del arroz; de este modo se rompe, en un alto porcentaje, la latencia ('dormancia') de la semilla (Montealegre y Clavijo, 1991a; Montealegre y Vargas, 1992).
- **Conteo y recolección de semillas.** Inmediatamente después de la recolección, se escogieron al azar, en cada uno de los tres lotes experimentales, cinco sitios y en los que se colocaron marcos de 0.50 x 0.50 m. Se contó luego en los marcos el número de semillas de PD, el biotipo predominante de arroz rojo, y se recolectaron semillas para hacer pruebas de germinación en el laboratorio.

- **Conteo 1 de plantas.** Las lluvias de la época y la humedad relativa alta permitieron (de 20 a 30 días después de la recolección) la germinación de semillas de arroz y el desarrollo de yemas en los tallos de la soca; se tomaron luego al azar cubos de suelo de 20 x 20 x 10 cm y en ellos se contó el número de coleóptilos de arroz ('embrillado'). Estas tres formas de reproducción del arroz dan el número de plantas de arroz rojo emergidas antes de la preparación del terreno. Hay que tener en cuenta, para el control de la maleza, que este recuento de plantas es menor en época seca.
- **Conteo 2 de plantas.** Pasados los 50 días de la cosecha, se preparó el terreno y se trazaron los caballones según las curvas de nivel, y se hizo el moje de germinación (por gravedad o con la lluvia). Se contó luego el número de plántulas emergidas del biotipo PD y el número de coleóptilos en sitios del perfil del suelo (hasta 10 cm de profundidad). Enseguida,

  – Se hace la primera 'quema química' del arroz rojo emergido.

- **Conteo 3 de plantas.** Pasados 20 días (70 después de la cosecha) se contaron las nuevas plántulas (de semillas germinadas) y las no controladas en la primera quema. Enseguida,

  – Se hace la segunda 'quema química' de estas plantas emergidas.

- **Conteo 4 de plantas.** Pasados de 0 a 20 días (80 ó 90 después de la cosecha) se hace un conteo igual al anterior. Enseguida,

  – Se hace la tercera quema de estas plantas emergidas.

Esta metodología se aplica en los planes de control del arroz rojo de lotes muy infestados con esta maleza que se van a sembrar con arroz.

El resultado del conteo en los tres lotes del ensayo anterior (cálculo del número/ unidad de área) es el siguiente:

- **Lote 1 Saldaña.** Semillas sobre el suelo, 1376; rebrotes de soca, 36; plántulas, 960; coleóptilos, 159.
- **Lote 2 Saldaña.** Semillas sobre el suelo, 2300 semillas; rebrotes de soca, 190; plántulas, 1247; coleóptilos, 1277; plántulas no controladas, 168. El lote está situado aguas abajo del distrito de riego, km 2 del canal principal, margen derecha.
- **Lote 3 Coello.** Semillas sobre el suelo, 1480; rebrotes de soca, 243; plántulas, 1728; coleóptilos, 89; plántulas no controladas, 240. Es el lote Talura del distrito de Uso Coello.

Los datos anteriores indican el potencial promedio de arroz rojo después de una recolección y antes de la siembra del arroz comercial, en un lote sembrado continuamente con arroz. Sin un control especial de la maleza, la infestación seguirá en aumento.

Riesgo ambiental

La rotación del arroz con otro cultivo atrae al agricultor si ese cultivo tiene un mercado aceptable; de lo contrario, seguirá sembrando arroz. Las instituciones competentes deberían ofrecer cultivos rentables y de mercado seguro para estimular la rotación del arroz. Algunos distritos de riego aprueban la siembra continua del arroz durante 3 ó 4 años para mejorar el ingreso de los cultivadores cuando el precio del grano es bueno. Prolongan, de este modo, el monocultivo del arroz exponiendo la zona arrocera a los riesgos fitosanitarios

asociados con el sistema de cultivo y a otros riesgos ambientales, por ejemplo: se eleva el nivel freático por exceso de agua de riego y esta humedad afecta los cultivos de frutales y de pancoger; se modifican algunas condiciones físicas, químicas y biológicas del suelo, lo que afecta a algunos microorganismos aeróbicos y a la meteorización de la materia orgánica; se incrementa el impacto ambiental: se requieren más herbicidas y más fertilización por el lavado de minerales del suelo.

Si se estimula la siembra de los cultivos semestrales de rotación y de algunos permanentes se evitan además riesgos económicos como los siguientes: aprobación de nuevas tierras para el cultivo rentable del arroz, elevar excesivamente el valor de la tierra con riego para arroz, y aumentar los costos del manejo (captación y suministro) de mayores volúmenes de agua de riego. En resumen, la rotación adecuada beneficia tanto al arroz como al bienestar ambiental de los cultivadores y de la región.

Competencia temprana

Después de vencer la latencia (o 'dormancia'), y dadas las condiciones ambientales favorables, la semilla de arroz rojo inicia su proceso de germinación y la plántula emerge. Comienza ahora la competencia entre el arroz común (de pericarpio blanco), el arroz rojo y otras malezas cuya semilla se ubica en los primeros 10 cm del perfil del suelo.

En un experimento (Alba y Clavijo, 2006) se evaluaron los dos eventos mencionados (germinación y emergencia), tanto en términos cuantitativos (porcentajes) como respecto a la *velocidad* de los procesos (porcentaje por día); se ensayaron semillas de los biotipos MP y PD de arroz rojo y las variedades Caribe 8, Fedearroz 50 y Fedearroz 2000. Se observó, en general, que no hubo diferencias significativas en cuanto a los porcentajes de germinación de semillas y de emergencia de plántulas (Cuadro 7) entre los biotipos de arroz rojo y las variedades de arroz común; en cambio, respecto a la velocidad de germinación y a la de emergencia, los biotipos rojos superaron a las variedades comerciales en 20% y en 54%, respectivamente.

En condiciones iguales, por tanto, el arroz rojo germinará en *menos días* que el arroz común, y su coleóptilo crecerá con mayor rapidez que el de este arroz para llegar a la superficie del suelo (o adentrarse en él).

Cuadro 7. Aspectos de la germinación y la emergencia de dos biotipos de arroz rojo y de tres variedades de arroz común, en un ensayo hecho en Colombia.

Biotipo o variedad	Índice de semilla[a]	Germinación (%)	Velocidad de germinación (%/día)	Radícula (cm)	Emergencia (%)	Velocidad de emergencia (%/día)
MP	25.7	91	31.8	3.9	72	30.0
PD	17.2	86	32.2	3.7	72	31.1
Caribe 8	28.9	99	23.9	5.3	71	14.2
Fedearroz 50	26.3	93	26.7	5.1	75	14.2
Fedearroz 2000	26.9	100	27.0	4.9	83	15.4

a. Es el peso de 100 semillas.

Resultados similares habían sido reportados por Clavijo y Baker (1986), quienes observaron que las semillas de arroz rojo germinaban más rápidamente que las de cuatro variedades comerciales de arroz, y que las plántulas de arroz rojo emergían también con más rapidez que las del arroz comercial. Asimismo, la longitud de la radícula y la longitud del coleóptilo de las semillas de arroz rojo germinadas aumentaban de modo notable una vez emergida la plántula inicial.

Interferencia con el cultivo

La habilidad de una especie para interferir con un cultivo depende de los recursos que la especie es capaz de capturar al comienzo de su período vegetativo, y de la velocidad con que emplea estos recursos. En un estudio reciente (Alba y Clavijo, 2006) se analizaron y compararon varias medidas morfo-fisiológicas de tres variedades de arroz y de un biotipo de arroz rojo, a los 20 y a los 40 días después de la emergencia (DDE), con el fin de establecer las ventajas de la competencia que hace el arroz rojo, en las primeras etapas de crecimiento, a las variedades comerciales Caribe 8, Fedearroz 50 y Fedearroz 2000; todas las semillas se sembraron según tres relaciones proporcionales diferentes en las parcelas: presencia de 100% (monocultivo), de 75% y de 25%.

Comportamiento a los 20 DDE
Respecto a las ***variedades comerciales***, los resultados a los 20 DDE (Cuadro 8) indican lo siguiente:

- En la medida en que las variedades reducen su presencia en los lotes (o sea, 75% y 25% de presencia en la mezcla sembrada), la altura de sus plantas, su área foliar por planta y su relación de área foliar (RAF) aumentan significativamente; ahora bien, estas tres modificaciones morfológicas son importantes para que la planta pueda competir adecuadamente.
- El peso seco total de las variedades también aumenta al reducirse su presencia, y ese incremento es mucho mayor cuando la variedad representa un 75% de la mezcla sembrada (25% es arroz rojo).
- La relación tallo/raíz disminuye significativamente (hasta la mitad del valor obtenido para las otras relaciones de mezcla) cuando la variedad no compite con la maleza (100% de presencia); esta disminución indica una alta producción de raíces, cuyo objetivo es extraer nutrientes y agua más intensamente para desarrollar más la parte aérea de las plantas. Hay que notar que la capacidad de intercambio catiónico (CIC) permanece igual en los tres porcentajes de mezcla de las variedades.
- En relación con la tasa absoluta de crecimiento (TAC), cada variedad exhibe un comportamiento muy particular en la medida en que disminuye su presencia en la mezcla de siembra (o sea, en 75% y en 25% de presencia):

  – Caribe 8 mantiene su crecimiento diario normal (su TAC), sin que la afecte la presencia del arroz rojo;
  – Fedearroz 50 lo incrementa en un 60% cuando está presente en las mezclas (75% y 25% de presencia);
  – Fedearroz 2000 lo incrementa 2.0 y 2.5 veces cuando está en competencia con la maleza a una presencia de 75% y de 25%, respectivamente, en las mezclas de siembra.

  Se puede concluir que Caribe 8 crece rápidamente y que Fedearroz 2000 competirá mejor.

Cuadro 8. Comportamiento morfo-fisiológico de tres variedades comerciales de arroz y del arroz rojo, tanto en monocultivo sin competencia (presencia 100%) como en dos mezclas (presencia 75% y 25%), a los 20 DDE.

Característica[a]	Valor para Caribe 8 presente a:			Valor para arroz rojo presente a:		
	100%	75%	25%	100%	75%	25%
Altura de planta (cm)	19.1	26.5	28.6	18.4	18.9	20.0
Área foliar (cm^2/planta)	6.6	16.7	13.0	5.2	7.9	8.3
Peso seco total (mg/planta)	66.2	85.3	63.4	36.8	26.4	41.3
Relación tallo/raíz	1.3	0.6	0.6	1.0	0.7	0.6
CIC (meq/100 g suelo)	60.8	44.5	61.8	52.5	64.8	71.5
TAC (mg/día)	3.3	3.2	3.1	2.2	3.2	1.3
RAF (cm^2/mg)	100.3	234.1	201.9	142.8	200.3	390.1
Característica[a]	Valor para Fedearroz 50 presente a:			Valor para arroz rojo presente a:		
	100%	75%	25%	100%	75%	25%
Altura de planta (cm)	22.5	25.3	25.5	18.4	18.2	20.8
Área foliar (cm^2/planta)	4.2	11.5	9.8	5.2	6.5	10.0
Peso seco total (mg/planta)	32.2	69.3	55.1	36.8	20.3	50.8
Relación tallo/raíz	1.3	0.5	0.5	1.0	0.5	0.6
CIC (meq/100 g suelo)	31.1	27.2	32.9	52.5	71.8	70.7
TAC (mg/día)	1.6	2.8	2.8	2.2	2.6	1.1
RAF (cm^2/mg)	129.8	215.9	191.1	142.8	216.4	319.2
Característica[a]	Valor para Fedearroz 2000 presente a:			Valor para arroz rojo presente a:		
	100%	75%	25%	100%	75%	25%
Altura de planta (cm)	18.3	26.4	27.8	18.4	20.8	20.4
Área foliar (cm^2/planta)	4.9	15.4	16.1	5.2	9.1	6.3
Peso seco total (mg/planta)	36.5	85.2	73.5	36.8	44.2	33.0
Relación tallo/raíz	0.8	0.5	0.5	1.0	0.6	0.6
CIC (meq/100 g suelo)	25.2	24.3	30.3	52.5	68.8	55.4
TAC (mg/día)	1.8	3.7	4.3	2.2	2.2	1.7
RAF (cm^2/mg)	134.2	220.6	190.0	142.8	253.5	217.0

a. CIC = capacidad de intercambio catiónico; TAC = tasa absoluta de crecimiento; RAF = relación de área foliar.

El comportamiento del ***arroz rojo***, como promedio de los biotipos MP y PD, y su comparación con el de las variedades comerciales (Cuadro 8) indican claramente que la maleza emplea sus modificaciones morfo-fisiológicas (antes mencionadas) para competir bien con las variedades:

- En la medida en que disminuye su presencia en la mezcla de siembra (o sea, a 75% y a 25% de participación), aumenta la altura de sus plantas y su área foliar; este aumento, sin embargo, no es tan dramático como el que presentan las variedades.
- El peso seco total por planta no presenta grandes variaciones como

efecto de la competencia; sin embargo, las plantas de arroz rojo tienden a incrementar ese peso cuando están en desventaja en la mezcla (75% y 25% de presencia).
- La relación tallo/raíz disminuye en un 40%, y esto puede atribuirse a la competencia con las variedades; en efecto, las plantas de arroz rojo emiten más raíces cuando interactúan en las mezclas (presencia de 75% y de 25%) y esta producción va acompañada de un incremento importante en la CIC, el cual las capacita para extraer más nutrientes y agua del suelo y enviarlos a su parte aérea para intensificar el crecimiento.
- La TAC se mantiene cuando la presencia de la maleza es de 75% en la mezcla de siembra, pero decae a la mitad de ese valor cuando su presencia es de 25%. Este comportamiento concuerda con el de las variedades, cuyo valor de TAC se mantiene o se incrementa en las mezclas; Fedearroz 2000 tendría un comportamiento excepcional, pues su TAC es muy alto en las mezclas.
- La RAF, finalmente, presenta un aumento significativo en la medida en que el arroz rojo disminuye su participación en la mezcla (75% y 25% de presencia); esto indica una mayor conversión de su peso seco en área foliar.

En conclusión, cuando el arroz rojo inicia su competencia con el arroz común, incrementa su producción de raíces y, por ende, su capacidad para extraer nutrientes y agua del suelo; estos aumentos redundan en una mejor conversión de la materia seca en área foliar, y ésta podrá capturar entonces más radiación solar fotosintéticamente activa que la variedad competidora.

En otro estudio de competencia temprana, Clavijo y Baker (1986) encontraron que el arroz rojo, a los 10 DDE, superaba a las variedades comerciales de arroz (en forma significativa) en la relación tallo/raíz, calculada ésta en términos de peso seco.

Comportamiento a los 40 DDE
A los 40 DDE (Cuadro 9) son evidentes los efectos negativos causados en las ***variedades comerciales*** por la competencia del arroz rojo:

- En general, la altura de las plantas, el número de macollas y el área foliar por planta se reducen mucho; la excepción es Caribe 8, que parece competir bien con la maleza y trata de que esos valores se mantengan similares a los que presenta en el unicultivo.
- El peso seco total por planta muestra la misma tendencia de las variables anteriores, aunque no disminuye mucho. Su composición varía porque las plantas siguen distribuyendo peso seco a las raíces en detrimento de su parte aérea.
- La relación tallo/raíz corrobora esa tendencia a la disminución. Esta relación se deprime notablemente (menos tallo y más raíz) por la competencia, en especial en las variedades Fedearroz 50 y Fedearroz 2000.
- La TRC también contribuye a esa tendencia, porque decrece en un 50%, reduciendo así la velocidad del crecimiento.
- La RAF mantiene su valor normal durante la competencia; esto significa que se distribuyen pocos asimilados al tallo y, en consecuencia, las plantas pierden altura y emiten pocas macollas.

El comportamiento del ***arroz rojo*** a los 40 DDE (Cuadro 9) indica que, en general, las diferentes variables medidas muestran un porcentaje muy pequeño de disminución atribuible a la competencia que le hacen las variedades comerciales:

Cuadro 9. Comportamiento morfo-fisiológico de tres variedades comerciales de arroz y del arroz rojo, tanto en monocultivo sin competencia (presencia 100%) como en dos mezclas (presencia 75% y 25%), a los 40 DDE.

Característica[a]	Valor para Caribe 8 presente a:			Valor para arroz rojo presente a:		
	100%	75%	25%	100%	75%	25%
Altura de planta (cm)	35.0	36.1	33.2	36.6	29.0	27.6
Macollas/planta (no.)	3.0	4.0	4.0	3.0	3.0	3.0
Área foliar (cm^2/planta)	29.22	26.2	20.2	26.6	12.5	14.3
Peso seco total (mg/planta)	320.6	422.6	270.5	197.5	178.2	126.8
Relación tallo/raíz	2.4	0.7	0.8	1.2	0.8	0.9
TRC (mg/mg•día)	78.9	82.3	72.5	84.0	71.8	88.7
RAF (cm^2/mg)	91.1	67.1	78.4	135.4	121.8	125.6
Característica[a]	Valor para Fedearroz 50 presente a:			Valor para arroz rojo presente a:		
	100%	75%	25%	100%	75%	25%
Altura de planta (cm)	34.9	29.8	26.9	36.6	24.9	24.8
Macollas/planta (no.)	7.0	4.0	4.0	3.0	2.0	2.0
Área foliar (cm^2/planta)	27.3	16.5	16.9	26.6	13.4	13.2
Peso seco total (mg/planta)	256.9	189.7	168.1	197.5	132.7	117.0
Relación tallo/raíz	4.5	0.6	0.7	1.2	0.8	0.7
TRC (mg/mg•día)	103.8	69.2	67.7	84.0	53.2	93.3
RAF (cm^2/mg)	105.2	88.2	103.0	135.4	106.3	117.0
Característica[a]	Valor para Fedearroz 2000 presente a:			Valor para arroz rojo presente a:		
	100%	75%	25%	100%	75%	25%
Altura de planta (cm)	32.3	31.0	28.8	36.6	26.4	26.6
Macollas/planta (no.)	7.0	4.0	4.0	3.0	3.0	3.0
Área foliar (cm^2/planta)	29.8	17.9	17.9	26.6	14.2	13.0
Peso seco total (mg/planta)	279.8	225.3	225.3	197.5	168.5	145.2
Relación tallo/raíz	5.4	0.6	0.6	1.2	0.7	0.7
TRC (mg/mg•día)	101.8	54.5	54.5	84.0	68.0	66.2
RAF (cm^2/mg)	106.5	82.9	82.9	135.4	104.7	100.0

a. TRC = tasa relativa de crecimiento; RAF = relación de área foliar.

- El área foliar total de la planta disminuye (caso excepcional) por causa de la competencia; esta disminución se registra en las hojas bajeras, que tienden a marchitarse, y no en la capacidad de producir hojas nuevas, ya que la RAF que presenta la maleza es alta en todo momento.
- No pierde macollas como efecto de la competencia, y la altura de sus plantas varía según la variedad comercial con que esté compitiendo; este comportamiento se considera importante.
- La materia seca se distribuye en forma impecable y sin cambios drásticos, como se demostró en el presente ensayo; la relación tallo/raíz, por ejemplo, disminuyó en 25% (en las variedades llega a disminuir en

85%), lo cual indica que la maleza distribuye su peso seco entre hojas, tallos y raíces de igual manera que en el unicultivo.
- El sistema de raíces tiende a incrementarse para lograr mayor extracción de nutrientes que desarrollen más el follaje y éste compita mejor por la luz (ver antes, a los 20 DDE). Refuerza esta tendencia la maleza porque mantiene estable la TRC, a pesar de la competencia (lo que no ocurre en las variedades comerciales).

Habilidad competitiva

El estudio presentado en este capítulo ha contribuido a lograr una comprensión más completa de la fisiología del arroz rojo (*Oryza sativa* L.) y ha complementado otras investigaciones relacionadas con esta maleza, como las siguientes: Clavijo y Baker (1986); Clavijo (1987); Montealegre y Clavijo (1991a), Clavijo (1996) y Clavijo (2004). En estos trabajos se ha demostrado, en particular, que la habilidad competitiva del arroz rojo reside en tres características:

- La habilidad para lograr un incremento cuantitativo de algunos de sus componentes morfológicos.
- La velocidad con que modifica esos componentes y ciertos procesos fisiológicos asociados con ellos.
- La capacidad para continuar distribuyendo proporcionalmente su materia seca, a pesar de la competencia que le hace el arroz común o comercial (característica comentada antes en este capítulo).

Manejo del problema

El manejo adecuado del arroz rojo en Colombia debe incluir tres aspectos:

- **Base científica.** Hay que entender bien la biología de esta maleza y de la variedad cultivada, en especial los siguientes aspectos: la dinámica de su población y su relación con el banco de semillas del suelo; la interacción entre el cultivo, la maleza y los herbicidas; y el estudio concienzudo de los diferentes métodos de manejo que se han propuesto. Esta información servirá para establecer un plan adecuado de manejo del arroz rojo que permita, en el ámbito regional, superar los desaciertos del manejo aplicado hasta la fecha. Los productores de arroz ya no pueden ignorar este problema de malezas.
- **Prácticas agronómicas.** Agrónomos e investigadores agrícolas han insistido durante años en las siguientes medidas de manejo del cultivo que, si se aplican todas y en forma adecuada, reducirán mucho las oportunidades de emergencia y de germinación de que dispone el arroz rojo:

  – semilla certificada y rotación de cultivos, para iniciar la descontaminación de los arrozales;
  – siembra de precisión y con maquinaria limpia (no contaminada con semillas extrañas);
  – manejo adecuado de la lámina de agua y otras medidas preventivas;
  – trasplante, si se cultiva en el sistema con riego;
  – emplear el sistema de socas, complementado con la distribución uniforme del tamo (o paja) sobre el terreno y con el correcto manejo de los lotes en poscosecha;
  – hacer una adecuada preparación del terreno para el siguiente cultivo;
  – evitar la siembra continua de arroz (hacer rotaciones);

  - garantizar buenos precios y mercadeo para la siembra de otros cultivos semestrales o anuales diferentes al arroz.

- **Control químico y otras prácticas.** Las prácticas de 'guapacheo', 'despalille' y 'trapeo químico' y la aplicación de hidrazida maleica (un retardador sintético del crecimiento vegetal usado exitosamente como herbicida) reducirán la posibilidad que tiene el arroz rojo de producir semilla y de engrosar su propio banco de semillas.

La aplicación de herbicidas no selectivos para 'quemar' las malezas antes de preparar el terreno, la incorporación de herbicidas adecuados en el suelo en presiembra y la aplicación de herbicidas estratégicos a la lámina de agua son tres medidas químicas que disminuirán la población presente (o futura) de arroz rojo.

La tecnología 'Clearfield' (sembrar variedades de arroz mejoradas genéticamente respecto a su resistencia a herbicidas del grupo de las imidazolinonas (ver Capítulo 23) y la siembra de materiales transgénicos de arroz abren una nueva posibilidad de hacer un manejo integrado del arroz rojo en Colombia.

Finalmente, estimular la siembra de cultivos diferentes del arroz en las zonas arroceras, ofreciendo buenos precios y planes de mercadeo.

Referencias bibliográficas

Alba, A.; Clavijo, J. 2006. Habilidades competitivas de dos biotipos de arroz rojo y de seis variedades de arroz blanco. Ediciones GalRobayoV y Arrocero Moderno, Bogotá, Colombia. [Disponible también en Revista Ventana al Campo Tropical, vols. 4-6.]

Angladette, A. 1969. El arroz. 1a. ed. Colección Agricultura Tropical. Editorial Blume, Barcelona. 867 p.

Baker, J.B.; Sonnier, E.A. 1983. Red rice and its control. Memorias. IRRI-IWSS Conference on Weed Control in Rice. International Rice Research Institute (IRRI), Los Baños, Laguna, Filipinas. p. 327-333.

Clavijo, J. 1987. Effects of interaction between red rice and two rice cultivars on morphological, physiological and ecological characteristics. Tesis (Ph.D.). Louisiana State University, Baton Rouge, LA, EE.UU. 120 p.

Clavijo, J. 1988a. El arroz rojo y su interferencia en el cultivo del arroz. In: ASIAVA (Asociación de Ingenieros Agrónomos del Valle). Arroz colombiano. Comunicadores Asociados, Bogotá, Colombia. p. 40-46.

Clavijo, J. 1988b. Efecto de la interacción entre arroz rojo y dos variedades de arroz en algunas de las funciones de la raíz. Revista COMALFI (Colombia) 15:3-8.

Clavijo, J. 1994. Marco teórico de la relación entre la fisiología del arroz y su competitividad con las malezas. In: Fedearroz (ed.). Primer foro de manejo integrado de malezas de arroz. Bogotá, Colombia. p. 12-16.

Clavijo, J. 1996. El arroz rojo en Colombia. In: Robayo, G. (ed.). Arrocero moderno: Con el mejor entorno ambiental. Comunicadores Asociados, Bogotá, Colombia. p. 49-53.

Clavijo, J. 1997. Cuantificación del banco de semillas de arroz rojo en tres épocas de evaluación. In: Memorias del XXVII Congreso Anual de la Sociedad Colombiana de Control del Malezas y Fisiología Vegetal (COMALFI). COMALFI, Bogotá, Colombia. p. 19.

Clavijo, J. 2000a. Investigación 2000: El arroz rojo en Colombia. Revista Ventana al Campo Tropical (Colombia) 3(1):5-9.

Clavijo, J. 2000b. Evolución en el manejo del arroz rojo. In: Memorias del XXX Congreso Anual de la Sociedad Colombiana de Control de Malezas y Fisiología Vegetal (COMALFI). COMALFI, Ibagué, Colombia. p. 37-43.

Clavijo, J. 2004. El arroz rojo en Colombia. In: Robayo, G. (ed.). Arrocero moderno. Bogotá, Colombia. p. 120-222. [Disponible también en Revista Ventana al Campo Tropical, vols. 1-3.]

Clavijo, J.; Baker, J.B. 1986. Early development of red rice and four rice cultivars. Proceedings of the Southern Weed Science Society 39:310.

Clavijo, J. et al. 2000. Influencia de cuatro factores fisiológicos en la germinación de dos tipos de arroz rojo. Revista Moliarroz (Colombia) 67:18-21.

Cohn, M.A.; Hughes, J.A. 1981. Seed dormancy in red rice (*Oryza sativa*); I: Effect of temperature on dry after-ripening. Weed Science 29: 402-404.

Montealegre, F.A. 2004. Variabilidad genética de arroces rojos en el cultivo del arroz. Ediciones GalRobayoV y Arrocero Moderno, Bogotá, Colombia. 244 p.

Montealegre, F.A.; Clavijo, J. 1991a. Análisis de la competencia entre tres tipos de arroz rojo y la variedad Oryzica 1. Revista Agronomía Colombiana (Colombia) 8(2):324-349.

Montealegre, F.A.; Clavijo, J. 1991b. Clasificación de algunos tipos de arroz rojo (*Oryza sativa* L.) en Colombia. Revista Arroz (Colombia) 40:16-23.

Montealegre, F.A.; Clavijo, J. 1992. Caracterización morfo-fisiológica de algunos tipos de arroz rojo (*Oryza sativa* L.) en Colombia. Revista Arroz (Colombia) 41(378):17-25.

Montealegre, F.A.; Vargas, P. 1992. Management and characterization of red rice in Colombia. In: Cuevas, F. (ed.). Rice in Latin America: Improvement, management and marketing. Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT) e International Rice Research Institute (IRRI), Los Baños, Filipinas. p. 119-139.

Montealegre, F.A.; Clavijo, J. 1994. Efectos ambientales y genéticos en la germinación y dormencia de los biotipos de arroz rojo. Revista Arroz 43(389):14-20.

Roberts, E.H. 1961. Dormancy of rice seed; II: The influence of covering structures. Journal of Experimental Botany 12:430-445.

Venegas, G.; Clavijo, J. [1999]. El banco de semillas de arroz rojo en la zona de Saldaña, Tolima. Fedearroz, Bogotá, Colombia.

Capítulo 23

Acción de los herbicidas en un arrozal: Modo y mecanismo

Jairo Clavijo

Contenido

	Página
Resumen	431
Abstract	432
Introducción	432
Acción de los herbicidas usados en arroz	433
Inhibidores de la acetil-CoA carboxilasa (ACC-asa)	433
Inhibidores de la acetolactato sintasa (ALS)	435
Inhibidores del fotosistema II	437
Captador de electrones del fotosistema I	439
Inhibidores de la protoporfirinógeno oxidasa (PPO)	440
Inhibidor de la síntesis de carotenoides	441
Inhibidor de la EPSP sintasa	441
Inhibidores de la formación de microtúbulos	442
Inhibidores de la síntesis de ácidos grasos de cadena larga	443
Inhibidores de la síntesis de lípidos (no ACC-asa)	444
Auxinas sintéticas	444
Referencias bibliográficas	445

Resumen

Se describen el modo y el wwmecanismo de acción de los herbicidas en el cultivo del arroz: inhibidores de la acetil-CoA carboxilasa (ACC-asa); de la acetolactato sintasa (ALS); del fotosistema II; captador de electrones del fotosistema I (paraquat); inhibidores de la protoporfirinógeno oxidasa (PPO); de la síntesis de carotenoides; de la EPSP sintasa; de la formación de microtúbulos; de la síntesis de ácidos grasos de cadena larga; de la síntesis de lípidos (no ACC-asa), y de las auxinas sintéticas. Se señala que el arroz es actualmente el cultivo que emplea el mayor número de herbicidas y el que consume la mayor cantidad de kilolitros de ingrediente activo por hectárea, entre los cultivos anuales en Colombia. En el país se aplican estos productos desde antes de la siembra, como 'quemantes', hasta la etapa de máximo macollamiento del cultivo, o 'aplicación postardía'. Este uso intensivo de productos agroquímicos —que implica, en algunos casos, el empleo de seis herbicidas en cinco aplicaciones (dos 'quemas', un 'sello' y dos aplicaciones en posemergencia)— puede

llegar a utilizar, en serie, varios ingredientes activos que tengan el mismo mecanismo de acción, creando así una alta presión de selección entre los biotipos de malezas. Además, este tipo de manejo representa entre el 18% y el 20% del costo de producción del cultivo.

Abstract

Action mode and mechanism of herbicides in rice fields

The action mode and mechanism of herbicides in rice crops are described, specifically inhibitors of acetyl-CoA carboxylase (ACC); acetolactate synthase (ALS); photosystem II; photosystem I electron acceptor (paraquat); protoporphyrinogen oxidase (PPO); carotenoid synthesis; EPSP synthase; microtubule formation; synthesis of long-chain fatty acids; lipid synthesis (no ACC); and synthetic auxins. Among the annual crops planted in Colombia, rice is currently the crop that uses the largest number of herbicides and the one that consumes the highest number of kiloliters of active ingredient per hectare. Products are applied prior to planting (burn-down) through the crop's maximum tillering stage (late postemergence). In some cases, this intensive use of agrochemical products implies the use of six herbicides in five applications (two burn-out herbicides, one sealer, and two postemergence applications). Several active ingredients with the same action mechanism can even be used, creating a high selection pressure among weed biotypes. Furthermore, this type of management accounts for 18%-20% of the crop's production costs.

Introducción

La acción fitotóxica total de un herbicida puede separarse en dos procesos bien diferenciados:

- **Modo de acción.** Se define como la suma de las respuestas anatómicas, fisiológicas y bioquímicas que dan lugar al efecto fitotóxico del agroquímico, es decir, la absorción, la traslocación y el metabolismo del producto en la planta.
- **Mecanismo de acción.** Comprende la acción bioquímica o biofísica primaria que conduce a la muerte de la planta; es decir, el efecto causado en una enzima o en una reacción metabólica simple (el sitio de acción) por la concentración más baja del herbicida o por cualquier concentración en el menor tiempo después de la aplicación.

El Comité de Acción sobre la Resistencia a los Herbicidas (HRAC, sus siglas en inglés) acoge actualmente sólo la expresión 'modo de acción' para referirse a los dos procesos mencionados; clasifica, además, los herbicidas alfabéticamente en tres listados: según su modo y sitio de acción, según la semejanza de los síntomas de su acción en la planta y según su familia química.

Entre los cultivos anuales de Colombia, el arroz es, actualmente, el que emplea el mayor número de herbicidas y el que consume la mayor cantidad de kilolitros de ingrediente activo por hectárea. Se aplican en el país estos productos desde antes de la siembra, como 'quemantes', hasta la etapa de máximo macollamiento del cultivo, como la comúnmente denominada aplicación 'postardía'.

Las malezas gramíneas y ciperáceas tienen una gran capacidad competitiva, que se manifiesta en su tasa alta de emergencia y en su rápido desarrollo inicial; su manejo, por tanto, debe ser *integral* y requiere una *planeación* especial. Si no actúa de este modo, el cultivador tiene que depender de la

solución rápida y efectiva, basada en la aplicación de herbicidas preemergentes y posemergentes que, a veces, es intensiva para poder contrarrestar la competencia que hacen las malezas al cultivo. Por otra parte, la presencia del arroz rojo en la mayoría de las zonas arroceras de monocultivo hace necesaria la aplicación de herbicidas no selectivos a poblaciones de malezas inducidas por el riego anterior a la siembra del arroz. Se hacen, además, mezclas de herbicidas posemergentes para resolver problemas específicos de malezas que no fueron controladas por los tratamientos antes mencionados.

Este *uso intensivo* de productos agroquímicos —que implica, en algunos casos, el empleo de seis herbicidas en cinco aplicaciones (dos 'quemas', un 'sello' y dos aplicaciones en posemergencia)— puede llegar a utilizar, en serie, varios ingredientes activos que tengan el mismo mecanismo de acción, creando así una alta *presión de selección* entre los biotipos de malezas. Ahora bien, este tipo de manejo representa del 18% al 20% del costo de producción del cultivo.

Acción de los herbicidas usados en arroz

Inhibidores de la acetil-CoA carboxilasa (ACC-asa)

Los ariloxi-fenoxi-propionatos (APP) y las ciclo-hexana-dionas (CHD) son dos grupos químicos que han dado ingredientes activos para herbicidas posermegentes que controlan especies de gramíneas en los cultivos de cereales y de dicotiledóneas. Aunque la química de estos dos grupos difiere sustancialmente, su actividad fisiológica y bioquímica en la planta indica que deben tener elementos estructurales comunes que son responsables de su acción herbicida.

- Los APP se formulan como ésteres del ácido original (ácido padre) para facilitar su absorción por las hojas. Después de penetrar en el tejido foliar, el éster es hidrolizado y el ácido padre queda libre. En general, los APP son herbicidas lipofílicos y no poseen la alta movilidad simplástica (paso de un ión de célula a célula mediante plasmodesmos) de los ácidos débiles; sin embargo, dos de ellos, el cyhalofop-butil y el fenoxaprop-etil (Figura 1) son absorbidos rápidamente por el follaje de las plantas y traslocados a los tejidos meristemáticos, donde ejercen su acción fitotóxica. En su mayoría, los herbicidas de este grupo tienen las siguientes características:

  – son descompuestos por microorganismos, especialmente bajo condiciones aeróbicas;
  – tienen baja movilidad y poca o ninguna actividad en el suelo;
  – la vida media del fenoxaprop-etil, por ejemplo, es de 9 días bajo

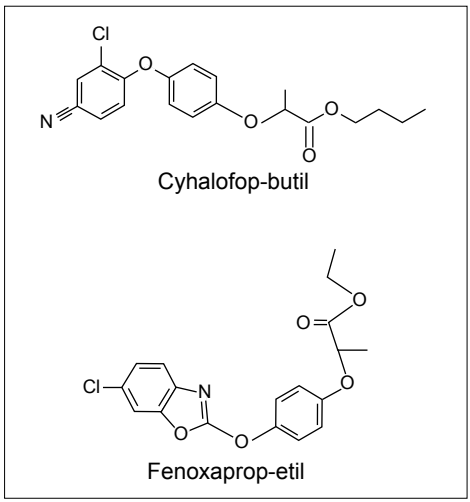


Figura 1. Dos ingredientes activos del grupo químico APP empleados como herbicidas en posemergencia.

condiciones aeróbicas y de 30 días en condiciones anaeróbicas;
- son incompatibles (por antagonismo) con los herbicidas hormonales y con las sulfonilureas; se recomienda, por tanto, aplicar estos últimos productos 7 días antes o 7 días después de la aplicación de un APP.

- Las CHD son ácidos débiles y muy móviles por el floema; algunas de ellas son muy inestables y están expuestas a una fotólisis rápida. No son persistentes en el suelo y la acción de los microorganismos las descompone fácilmente. Su vida media varía entre 3 y 5 días. La que se usa como ingrediente activo para controlar malezas en arrozales es el profoxidim o clefoxidim (Figura 2).

Los **efectos morfológicos** de estos dos grupos químicos en las plantas se aprecian principalmente en los meristemas, tanto los apicales como los intercalares: en ambos se detiene el crecimiento rápidamente después de la aplicación de los productos. Las hojas que emerjan se verán cloróticas al principio y más adelante tendrán apariencia necrótica y se desprenderán fácilmente del punto de inserción. Estos síntomas se desarrollan lentamente. Los dos grupos son graminicidas típicos y se conocen como 'fops' (los APP) y como 'dims' (las CHD). Se denominan también 'inhibidores de la síntesis de lípidos'.

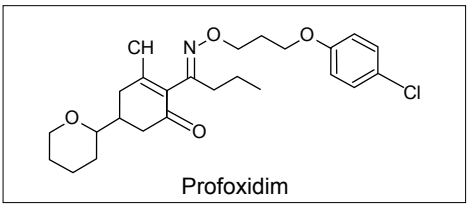


Figura 2. Ingrediente activo del grupo de las CHD empleado como herbicida en el cultivo del arroz.

Mecanismos de acción
Se han propuesto dos mecanismos para estos dos grupos de herbicidas:

- Un ***mecanismo bioquímico***, que consiste en la inhibición de la enzima acetil-CoA carboxilasa (ACC-asa) y, por consiguiente, de la biosíntesis de lípidos en los plastidios. Ahora bien, la biosíntesis de los ácidos grasos y de los lípidos es esencial para el crecimiento y el desarrollo de las plantas; esta biosíntesis se inicia con la síntesis de la malonil-CoA a partir del acetil-CoA, la cual es catalizada por la enzima acetil-CoA carboxilasa.
- Un ***mecanismo biofísico***, que altera el gradiente de protones que se establece a través de la membrana plasmática. El gradiente ocurre gracias a la acción de una bomba electrogénica de protones, que es manejada por la hidrólisis del ATP (tanto en el plasmalemma como en el tonoplasto), que facilita el transporte activo de solutos orgánicos e inorgánicos a través de las membranas dichas, y que participa, además, en la regulación del pH intracelular.

De estos dos mecanismos de acción, el primero (inhibición de la ACC-asa) está mejor caracterizado por los ensayos *in vitro* que se han hecho y por la correlación observada entre la planta *in vivo* y la sensibilidad de la enzima. Se cree también que estos dos efectos (el bioquímico y el biofísico) ocurren, probablemente, de manera simultánea, al menos durante las primeras 12 horas después de la aplicación del herbicida. Por otra parte, el antagonismo de los compuestos auxínicos a la fitotoxicidad de los APP no implica una interacción con la ACC-asa sino más bien una asociación entre esos compuestos y algún estímulo de la actividad de la H^+-ATP-asa, que altera el gradiente de protones de la membrana plasmática, disminuyéndolo.

Resistencia
Puesto que los ariloxi-fenoxi-propionatos y las ciclo-hexana-dionas controlan gramíneas solamente, la resistencia a estos dos herbicidas se desarrolla en especies pertenecientes a ese grupo de plantas. De todos los biotipos resistentes de que se ha recibido información, 12% lo son por el uso repetido que se ha hecho de ambos herbicidas durante años. Estos biotipos resistentes se encuentran, por ejemplo, en las especies *Avena fatua*, *Digitaria sanguinalis*, *Echinochloa* spp., *Eleusine índica*, *lschaemum rugosum*, *Lolium* spp. y *Sorghum halapense*.

Inhibidores de la acetolactato sintasa (ALS)

Los inhibidores de la acetolactato sintasa pertenecen a cinco grupos químicos, pero los productos que se comercializan en Colombia contra las malezas del cultivo del arroz pertenecen a tres de ellos solamente: sulfonilureas, imidazolinonas y pirimidinil-tiobenzoatos. Su popularidad se debe a las siguientes características: se usan en dosis bajas, su impacto ambiental es bajo, la toxicidad que causan a los mamíferos es leve y su eficacia es grande.

Sulfonilureas
A este grupo pertenecen los siguientes ingredientes activos: azimsulfuron, etoxisulfuron, metsulfuron-metil y pirazosulfuron-etil (Figura 3). En general, estos herbicidas se aplican en posemergencia, aunque algunos se pueden recomendar en preemergencia para el control selectivo de malezas de hoja ancha y de ciperáceas. Las hojas y las raíces de las malezas los absorben fácilmente y el xilema los trasloca ampliamente cuando la absorción es radical; la traslocación tiene menor alcance por el floema cuando la aplicación es foliar. Las sulfonilureas se acumulan en los tejidos meristemáticos.

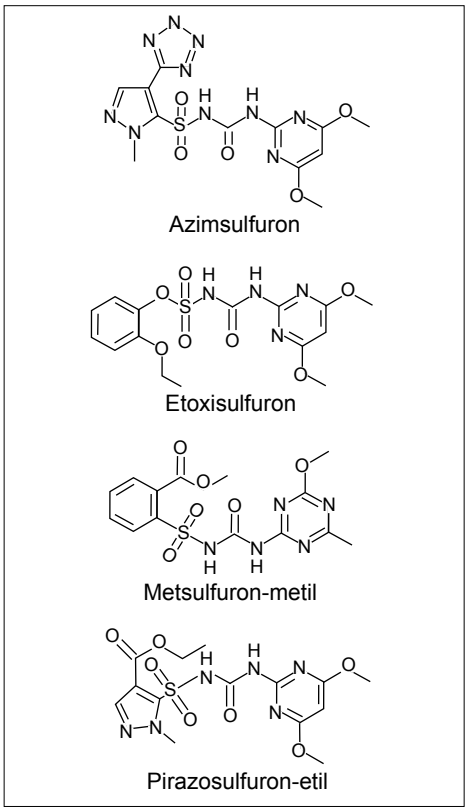


Figura 3. Cuatro productos herbicidas pertenecientes al grupo químico de las sulfonilureas, que inhiben la enzima ALS.

Síntomas. El crecimiento de las plantas se inhibe pocas horas después de su aplicación, aunque los síntomas de fitotoxicidad aparecen de 1 a 2 semanas más tarde. Estos síntomas son, principalmente: clorosis de las áreas meristemáticas y de las hojas jóvenes, malformación de las hojas, aumento de la síntesis de antocianinas y muerte de tejidos (necrosis).

Degradación. En la planta, las sulfonilureas son metabolizadas por hidroxilación del anillo bencénico en el carbono 4, seguida de conjugación con glucosa. En el suelo se degradan por hidroxilación y por acción microbiana.

Las sulfonilureas son también adsorbidas por la materia orgánica del suelo, principalmente a pH bajo. La persistencia de estos herbicidas varía de pocos días a 40 días (si el pH del suelo es alto).

Imidazolinonas

Este grupo está representado por el ingrediente activo imazapir (Figura 4) que, junto con la variedad de arroz CF-205, conforma un sistema de control de malezas registrado por BASF y denominado 'clearfield' (campo limpio). El imazapir se puede aplicar desde la preemergencia hasta cuando las malezas y el arroz rojo tengan cuatro hojas en posemergencia y el arroz del sistema 'clearfield' (CF-205) tenga cuatro hojas. Este producto se puede aplicar únicamente a la variedad de arroz 'Clearfield®'.

Síntomas. El imazapir puede ser absorbido por el follaje o por las raíces en un período de 24 horas y se trasloca rápidamente por el floema o el xilema. El producto inhibe el crecimiento de las malezas pocas horas después de su aplicación, pero los síntomas de fitotoxicidad sólo aparecen de 1 a 2 semanas más tarde. Las áreas meristemáticas de la planta afectada se tornan gradualmente cloróticas, y la clorosis se extiende luego lentamente en las hojas que, finalmente, mueren (necrosis foliar).

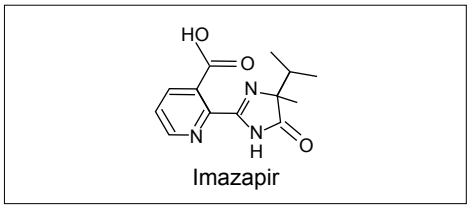


Figura 4. Imazapir, un herbicida del grupo de las imidazolinonas, empleado en el sistema de manejo de malezas 'clearfield' de la BASF.

Degradación. En las plantas, el imazapir puede ser metabolizado por hidroxilación del anillo bencénico para formar el ácido 2-carbamoilnicotinico y, posteriormente, un derivado del ácido, el imidazo-pirrolopiridino. En el suelo, el producto es degradado por los microorganismos, especialmente bajo condiciones aeróbicas; también se une fuertemente a la materia orgánica. Si el suelo está seco, el producto es adsorbido por las partículas del suelo, pero si está húmedo, queda libre y es entonces degradado o tomado por las plantas. Si el pH es menor que 6.5, el imazapir es fuertemente adsorbido por la arcilla y por la materia orgánica; si el pH es mayor que ese valor, el producto es fácilmente degradado por los microorganismos. Tiene poca movilidad en el suelo y su vida media varía de 25 a 142 días, lo que depende de las condiciones del suelo.

Pirimidinil-tiobenzoatos

A este grupo pertenece el bispiribac-sodio, un herbicida posemergente que controla una amplia gama de malezas gramíneas, ciperáceas, commelináceas y dicotiledóneas que aparecen en el cultivo de arroz.

Síntomas. El bispiribac-sodio es absorbido fácilmente por el follaje y por las raíces y se trasloca por el floema y por el xilema. Las malezas sensibles al producto suspenden su crecimiento, se vuelven cloróticas, sus tejidos jóvenes mueren (necrosis) y, finalmente, la planta muere.

Degradación. El bispiribac-sodio (Figura 5) es metabolizado por hidrólisis dentro de la planta y es degradado por microorganismos en el suelo. Presenta una movilidad entre media y baja, lo que depende del tipo de suelo y de su cantidad de materia orgánica. Tiene una vida media entre 45 y 60 días, según las condiciones del medio.

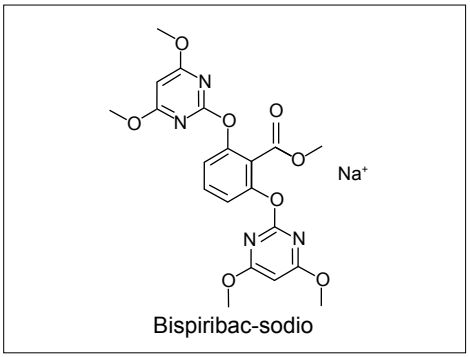


Figura 5. Un herbicida del grupo químico de los pirimidinil-tiobenzoatos que inhibe la ALS en las malezas que controla.

Mecanismo de acción

Los compuestos anteriormente mencionados comparten un mismo sitio de acción en la planta, que es la enzima acetolactato sintasa (ALS); ésta es la primera enzima común en la biosíntesis de los aminoácidos valina, leucina e isoleucina. Se la conoce también como acetohidroxiácido sintasa (AHAS), cuando se localiza en el cloroplasto. Se han aislado tres isoenzimas, de las cuales la más sensible es la ALS II, que tiene capacidad para condensar dos moléculas de piruvato formando el acetolactato (el precursor de la valina y la leucina), y para unir una molécula de piruvato con una de ketobutirato, formando así el acetohidroxibutirato (el precursor de la isoleucina).

Resistencia

La actividad residual de muchos de los inhibidores de ALS aquí mencionados ha contribuido al desarrollo de resistencia a los productos, porque esa actividad incrementa la efectividad del control y, por ende, la presión de selección sobre las malezas. En algunos casos, aunque se mezclaron herbicidas de diferente mecanismo de acción, la presión de selección permaneció relativamente alta, por la siguiente razón: el control efectivo de los biotipos susceptibles continúa, muchas veces, más allá del período de eficacia del componente menos residual de la mezcla aplicada.

Entre todos los biotipos de malezas resistentes que se han mencionado hasta la fecha, el mayor número (31%) está relacionado con el mecanismo de acción de los herbicidas aquí considerados.

Inhibidores del fotosistema II

A varios grupos químicos pertenecen los herbicidas que inhiben la fotosíntesis al nivel del fotosistema II; se distribuyen, además, en tres subclases (C1, C2 y C3) según la forma en que se unen a la proteína D_1. Por ejemplo, el ingrediente activo propanil pertenece a la familia química de las amidas y entra en la subclase C2; el ioxinil es un nitrilo y el bentazón es una benzotio-diazinona, y ambos pertenecen a la subclase C3 (Figura 6).

Propanil

Este herbicida es muy selectivo respecto al arroz. Se aplica en posemergencia para controlar algunas

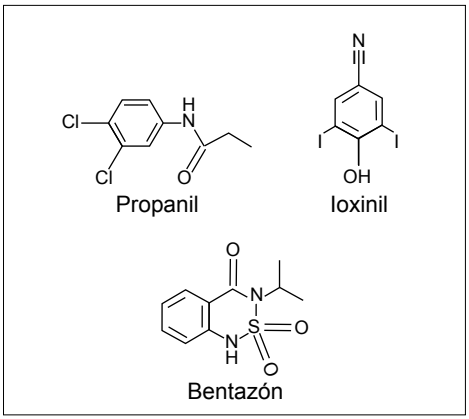


Figura 6. Tres herbicidas que inhiben el fotosistema II de la fotosíntesis.

malezas gramíneas, casi todas las de hoja ancha y muchas especies de ciperáceas. El follaje lo absorbe fácilmente, pero su movilidad dentro de la planta, desde el sitio tratado hasta los puntos de crecimiento, es limitada.

Síntomas. Su acción herbicida empieza con la clorosis de las plantas a los pocos días de aplicado; viene luego un secamiento foliar y finalmente la necrosis de los tejidos. Su acción es rápida y se inicia de 4 a 8 horas después de aplicado.

Degradación. El propanil es hidrolizado rápidamente en la planta de arroz por la enzima arilacil-amidasa, y se convierte en 3,4-dicloroanilina. Esta reacción metabólica del arroz, que es diferencial, le permite al propanol ser muy selectivo respecto a este cultivo, al tiempo que controla otras gramíneas. En el suelo, y en condiciones aeróbicas, el compuesto es metabolizado hasta ácido propiónico y 3,4-dicloroanilina, 7 días después de su aplicación; en condiciones anaeróbicas, esta degradación dura 14 días. Esos dos metabolitos son adsorbidos por la materia orgánica o pueden ser atacados por micoorganismos. La vida media del propanil está entre 1 y 3 días, bajo condiciones de humedad y temperatura altas.

Resistencia. En Colombia, Costa Rica y Estados Unidos se han encontrado biotipos de la maleza *Echinochloa colona* resistentes al propanil, especialmente en terrenos en que se han hecho aplicaciones continuas del producto durante más de 10 años. En otros países se ha reportado la resistencia de la maleza *Echinochloa crus-galli.*

Ioxinil

Este producto se aplica al arroz en mezcla formulada con 2,4-D para controlar malezas de hoja ancha y ciperáceas en posemergencia, incluyendo especies resistentes al 2,4-D. El follaje de las malezas absorbe fácilmente el herbicida, pero su traslocación es mínima: actúa por contacto.

Síntomas. Los síntomas aparecen a las pocas horas de aplicado: son manchas necróticas sobre las hojas y clorosis alrededor de ellas, hasta que toda la hoja se seca. El ioxinil puede actuar también como desacoplador en la fosforilación oxidativa, como hacen los disruptores de membranas.

Degradación. En las plantas, el anillo bencénico se hidroxila, probablemente, y luego se conjuga. En el suelo, los microorganismos lo degradan. Su vida media es de 7 días.

Bentazón

Es un herbicida selectivo, posemergente y de contacto, que controla malezas de hoja ancha y ciperáceas en el cultivo del arroz. Es absorbido principalmente por el follaje. Se requieren como mínimo 4 horas de tiempo seco después de la aplicación para que pueda actuar; la lluvia lo lava del follaje.

Síntomas. El primer síntoma es una clorosis que empieza de 3 a 5 días después de la aplicación; la clorosis avanza hasta producir necrosis de los tejidos foliares y, finalmente, secamiento de las hojas.

Degradación. En la planta se metaboliza rápidamente formando conjugados glucosilados. En el suelo es débilmente adsorbido por las partículas de suelo; también es degradado por los microorganismos. Su vida media es de 20 días.

Mecanismo de acción

Estos inhibidores de la fotosíntesis actúan de la siguiente manera:

- Se unen primero a la plastoquinona Q_B en su nicho sobre la proteína D_1 del fotosistema II, en las membranas tilakoides del cloroplasto.
- Esa unión bloquea el flujo de electrones desde Q_A hasta Q_B.
- Este bloqueo impide la reducción de NADP (nicotinamida adenín dinucleótido fosfato), un compuesto necesario para la fijación del CO_2.

Ahora bien, la acción herbicida de estos compuestos no consiste tanto en la interrupción de la fotosíntesis sino en el *estrés oxidativo* que genera al bloquear el transporte fotosintético de electrones; este bloqueo destruye el centro de reacción del fotosistema II, y causa la foto-oxidación de la clorofila y de los lípidos.

Se ha propuesto, además, una interferencia en el proceso de degradación y nueva síntesis de la proteína, el cual opera normalmente para reparar el daño oxidativo que aparece durante la operación del fotosistema II.

El comportamiento de adhesión a la proteína D_1 que exhiben estos compuestos se relaciona con la fuerte interacción que hay entre ellos y los aminoácidos presentes en el nicho de la plastoquinona Q_B. Se ha observado que el propanil interactúa con Ser 264, mientras que ioxinil y bentazón lo hacen con His 215.

Resistencia

Conviene mencionar que el mecanismo de acción descrito ha generado un número muy alto de biotipos resistentes (ocupa el segundo lugar después de los inhibidores de la ALS), es decir, un 23% de todos los biotipos resistentes de que se ha informado hoy en el mundo. Hay casi certeza de que la causa de esta resistencia es una mutación ocurrida en la cadena de aminoácidos en el sitio de acción.

Captador de electrones del fotosistema I

En el grupo químico de los bipiridilos hay dos ingredientes activos de herbicidas, de los cuales paraquat se emplea en el cultivo del arroz para la 'quema química', ya que actúa por contacto y no es selectivo, es decir, controla especies de hoja ancha y de hoja angosta, ya sea en aplicación total o dirigida (Figura 7).

El paraquat es absorbido por las hojas de las malezas pero, en condiciones normales, no se trasloca fácilmente a otras partes de la planta. Sus efectos son relativamente rápidos y necesita luz para ser más efectivo.

Síntomas. Los síntomas que produce son desecación de las hojas, necrosis de tejidos foliares y, finalmente, la muerte de las hojas. La causa probable de los síntomas es la disrupción de las membranas celulares, porque las especies reactivas a base de oxígeno (especialmente el radical hidroxilo, OH^-) que se forman en la planta, una vez aplicado el herbicida, actúan sobre los lípidos de las membranas.

Degradación. En el suelo, el paraquat es inactivado rápidamente porque establece un fuerte enlace con las arcillas. No hay evidencia de degradación del producto por la planta pero puede sufrir fotodescomposición sobre la superficie de las hojas.

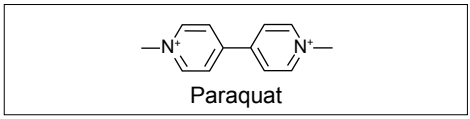


Figura 7. Un herbicida del grupo químico de los bipiridilos empleado para hacer 'quema química'.

Mecanismo de acción
El paraquat es un compuesto redox activo que interactúa con el fotosistema I de la reacción de luz de la fotosíntesis, capturando los electrones de uno de los centros de hierro y azufre y formando un radical catión bipiridilo (BP^+); éste es inestable y reacciona rápidamente con el oxígeno, regenerando luego el catión y produciendo varios compuestos fitotóxicos, como el peróxido de hidrógeno (H_2O_2), el radical superóxido (O_2^-), el radical hidroxilo (OH^-) y el oxígeno simple (O_2).

Resistencia
Se han encontrado, en total, 22 biotipos resistentes a paraquat, principalmente de los géneros *Coniza, Erigeron* y *Poa*: representan un 8% de todos los biotipos resistentes a herbicidas que hayan sido mencionados. El mecanismo de resistencia a paraquat no ha sido bien establecido, y se cree que es muy poco frecuente en las poblaciones naturales.

Inhibidores de la protoporfirinógeno oxidasa (PPO)

Los difenil éteres y los oxadiazoles son dos familias químicas que comparten el mecanismo de acción mencionado; en la primera está el oxifluorfén y en la segunda el oxadiazón (Figura 8). Estos productos se utilizan para controlar malezas gramíneas y de hoja ancha. Se consideran herbicidas de contacto, con capacidad para destruir membranas de células vegetales, de acción rápida, y de escaso o nulo movimiento dentro de la planta cuando son absorbidos.

En general, se aplican en preemergencia sobre suelos húmedos y bien preparados, donde son absorbidos por las plántulas de las malezas que están en crecimiento activo; aunque éstas logran emerger, son débiles y presentan tejidos necróticos y secos.

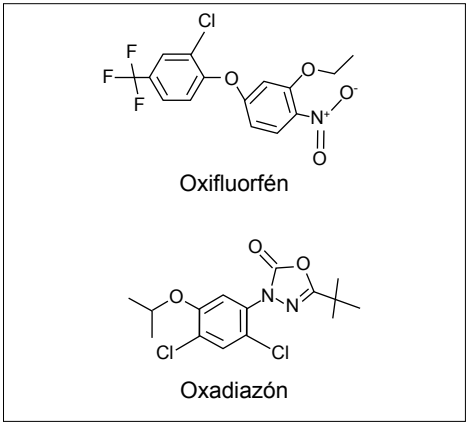


Figura 8. Un difenil éter y un oxadiazol que controlan malezas gramíneas y de hoja ancha en los arrozales.

Degradación
En las plantas, se metabolizan por hidroxilación de los anillos y luego por conjugación con glucosa o lignina. En el suelo, son fuertemente adsorbidos por los coloides del suelo, donde quedan inmovilizados. El oxifluorfén puede ser también fotodegradado o descompuesto por los microorganismos, y su vida media es de 35 días; la del oxadiazón llega a 60 días.

Mecanismo de acción
El sitio de acción de estos dos compuestos es la enzima protoporfirinógeno oxidasa, que cataliza la oxidación del protoporfirinógeno IX a protoporfirina IX durante la biosíntesis de clorofila y de un heme (una ferroprotoporfirina o, si está libre, un grupo prostético o complejo de coordinación que lleva un átomo de Fe). Ambos inhiben la enzima y, como resultado, se acumula la protoporfirina IX; ésta absorbe luz y produce un estrés oxidativo que ataca lípidos y proteínas en las células, dando como resultado una pérdida de clorofila y de carotenoides.

Los biotipos ***resistentes*** a este herbicida son muy pocos: solamente representan un 0.3% de todos los casos reconocidos actualmente.

Inhibidor de la síntesis de carotenoides

Entre los diferentes grupos de herbicidas que producen blanqueamiento de los tejidos vegetales están las isoxazolidinonas; a ellas pertenece el ingrediente activo clomazone, que se usa para el control de malezas gramíneas, en preemergencia y en posemergencia temprana, en el cultivo del arroz (Figura 9). Por su residualidad y por su compatibilidad con herbicidas de contacto, este producto puede usarse como 'sello' o en presiembra como 'quema química'.

Síntomas
El clomazone penetra fácilmente en las plantas por las raíces y por los ápices o retoños (el coleóptilo y el hipocótilo) y es traslocado por el xilema al follaje. Cuando se aplica al follaje, la planta lo absorbe mucho más lentamente. Las plántulas de las malezas susceptibles emergen del suelo tratado exhibiendo un color de blanco a translúcido y se vuelven cloróticas unos días más tarde. Aplicado en posemergencia, las partes tratadas de las plantas se tornan blancas; lo mismo ocurre con las plantas que son alcanzadas por los vapores en lotes aledaños al área asperjada.

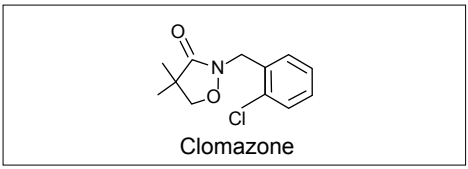


Figura 9. Una isoxazolidinona que controla malezas gramíneas en el arroz.

Se desconoce aún el ***mecanismo de acción*** del clomazone, aunque se sabe que sus moléculas interfieren en la síntesis de carotenoides e inhiben, aparentemente, una enzima después de la formación del farnesil pirofosfato.

Degradación
En las especies de hoja ancha (malezas o cultivos como la soya), las moléculas de clomazone presentan un rompimiento oxidativo en el que se producen metabolitos de alta polaridad; este metabolismo diferencial es el que confiere tolerancia a las plantas de hoja ancha. En el suelo, la molécula de clomazone es degradada fácilmente por los microorganismos; también es susceptible de fotodegradación. Su vida media en el suelo es, en promedio, de 24 días (varía entre 16 y 36 días).

Hasta el momento no se conocen malezas resistentes a clomazone en condiciones de campo.

Inhibidor de la EPSP sintasa

Del grupo químico de las glicinas, el glifosato es el principal herbicida empleado en los cultivos de arroz (Figura 10). El glifosato es un compuesto no residual y no selectivo que actúa en las hojas, que lo absorben sin dificultad; mezclado con sulfato de amonio o con un surfactante (o con ambos compuestos), mejora su penetración. Es traslocado por el xilema y por el floema, aunque sigue, principalmente, el movimiento de los fotoasimilados que van de la fuente al sitio de demanda.

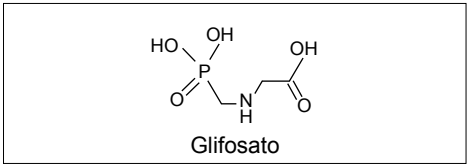


Figura 10. Un herbicida del grupo de las glicinas muy usado en arroz.

Se hacen aplicaciones totales o dirigidas de glifosato en un sinnúmero de situaciones agrícolas. En arroz es el herbicida más usado para hacer 'quema química' antes de la siembra y para controlar el arroz rojo al término del cultivo, haciendo de 'trapero químico'.

Síntomas
Entre sus efectos morfológicos más importantes está la clorosis de las hojas, que es seguida por una necrosis foliar, por anormalidades en las hojas de los rebrotes (macollas) y por el desarrollo de múltiples tallos. El glifosato se degrada lentamente en las plantas y sus principales metabolitos son el aminometil fosfonato, la sarcosina y la glicina.

Mecanismo de acción
El mecanismo principal es la inhibición de la enzima 5-enolpiruvilshiquimato-3-fosfato sintasa (EPSPS), que es la penúltima enzima en la síntesis de aminoácidos aromáticos por la ruta del ácido shiquímico. La enzima cataliza la formación de enolpiruvilshiquimato fosfato y de un fosfato inorgánico a partir de fosfoenilpiruvato y de shiquimato 3-fosfato, en una reacción de transferencia de un carbovinilo. El glifosato actúa como un inhibidor competitivo de la EPSPS respecto al fosfoenolpiruvato, y la inhibe interactuando con ella para formar un complejo. Aunque otras enzimas utilizan el fosfoenolpiruvato, sólo la EPSPS interactúa con éste en un complejo enzima-sustrato en que la enzima ya no actúa libremente. El glifosato actúa entonces como un análogo del fosfoenolpiruvato en un estado de transición. La planta muere por falta de sus aminoácidos aromáticos (triptófano, tirosina y fenilalanina), aunque hay pruebas evidentes de que el herbicida afecta otros procesos de la planta.

Resistencia
Desde su introducción en 1974, el glifosato ha sido usado extensamente. Sin embargo, el porcentaje de malezas resistentes a este herbicida de que se ha tenido mención hasta ahora no alcanza el 2% de todos los biotipos resistentes en condiciones de campo que se conocen. Las hay, por ejemplo, entre especies de los géneros *Conyza, Lolium* y *Eleusine*.

Se ha propuesto una nueva y particular estrategia de manejo de malezas basada en los siguientes puntos: sembrar un cultivar de arroz (o de otro cultivo) resistente al glifosato; controlar las malezas haciendo aplicaciones totales de un herbicida no selectivo, no residual y benigno para el ambiente, en este caso el glifosato; hacer rotación con otro cultivo y rotar por tanto los herbicidas de acuerdo con la selectividad de cada cultivo.

Inhibidores de la formación de microtúbulos

Diversas familias químicas inhiben el desarrollo de los microtúbulos celulares; entre ellas están las dinitroanilinas, y una de éstas, la pendimetalina, es ingrediente activo de un herbicida que se aplica al arroz.

La pendimetalina es un herbicida residual y selectivo que elimina las gramíneas anuales y la mayoría de las malezas de hoja ancha. Se aplica al suelo tanto en preemergencia como en posemergencia temprana. El producto es absorbido por las semillas de las malezas desde que están en proceso de germinación hasta cuando tienen dos hojas, como máximo. Su selectividad se basa en el contenido de lípidos de la semilla, que es mayor en las dicotiledóneas que en las monocotiledóneas: a menos lípidos seminales (como en las gramíneas), mayor efectividad del herbicida.

Mecanismo de acción

La pendimetalina no se trasloca porque las raicillas que emite la semilla y el tallito de la plántula en emergencia la absorben; el crecimiento de estas estructuras se inhibe porque el producto afecta la división celular. La molécula de pendimetalina (Figura 11) es un disruptor mitótico (un veneno de la célula en mitosis). En las raíces tratadas, las células avanzan normalmente hasta la metafase pero no pasan al siguiente estado, porque los cromosomas duplicados quedan envueltos en una membrana nuclear que no permite su expansión. Además, las fotografías tomadas con el microscopio electrónico revelan un huso cromático muy pobre en microtúbulos, estructuras que se encargan del movimiento de los cromosomas dentro de la célula durante la mitosis. Los análisis bioquímicos han detectado una alta concentración de tubulina en los tejidos de estas raíces, lo que demuestra que esta proteína no se polimeriza bien cuando forma los microtúbulos. El herbicida se metaboliza en el suelo y sus metabolitos pueden ser transportados por la planta, los absorbe por las raíces y los transporta en el xilema con el agua absorbida.

Resistencia

Aunque este herbicida se usa extensamente y es muy eficaz, existen pocos informes (sólo un 3.5% del total reportado) de biotipos de malezas resistentes a las dinitroanilinas, entre ellos los pertenecientes a las especies *Eleusine indica, Setaria viridis* y *Sorghum halapense.*

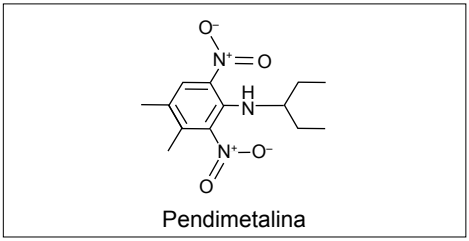


Figura 11. Una dinitroanilina que inhibe el crecimiento de los microtúbulos en las células de las malezas.

Inhibidores de la síntesis de ácidos grasos de cadena larga

Estos compuestos se conocen también como inhibidores de la división celular. Tienen este mecanismo de acción butaclor y pretilaclor, que pertenecen a las cloroacetamidas (Figura 12), y también anilofos y piperofos, que no tienen un grupo químico definido (Figura 13).

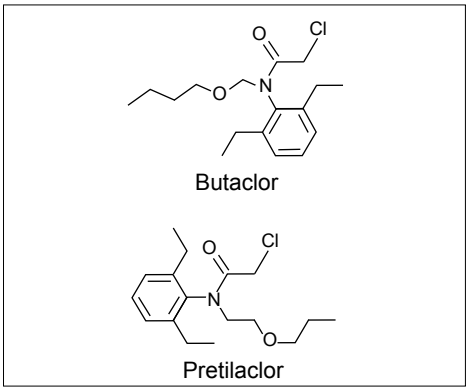


Figura 12. Dos cloroacetamidas que inhiben la división celular en las malezas de los arrozales.

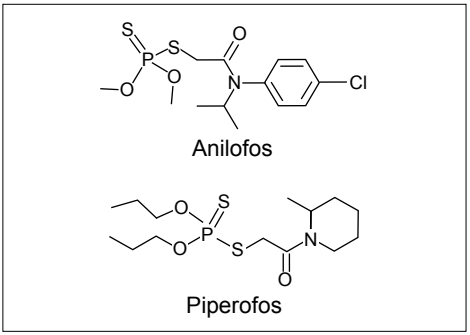


Figura 13. Dos herbicidas selectivos del arroz que inhiben la síntesis de ácidos grasos en las malezas que controlan.

Estos herbicidas son selectivos del arroz, y hacen un buen control de malezas en especies de gramíneas, de ciperáceas y en algunas de hoja ancha. Cuando se utilizan solos, se aplican al suelo en preemergencia; cuando se mezclan con propanil, son sinergistas que rompen la resistencia de *Echinochloa* sp. y se aplican en posemergencia del arroz, desde que las plantas emiten la primera hoja hasta que inician la etapa de macollamiento.

Síntomas y acción
Son absorbidos, generalmente, por el coleóptilo o el epicótilo de las plántulas de las malezas, y les causan deformaciones morfológicas o les inhiben su crecimiento y, al final, la mayoría de ellas no emergen. Estos herbicidas son metabolizados por hidrólisis dentro de las plantas y son también adsorbidos por los coloides del suelo.

No se conoce aún su sitio exacto de acción en las malezas; se postula, sin embargo, una posible conjugación con la acetil-coenzima A, cuya consecuencia sería la inhibición de varias rutas metabólicas en la planta, como la síntesis de ácidos grasos y lípidos, de proteínas, de isoprenoides (giberelinas) y de flavonoides (antocianinas).

Entre todos los biotipos de malezas resistentes a los herbicidas en el mundo, sólo un 0.3% lo son por resistencia en el campo a estos cuatro productos.

Inhibidores de la síntesis de lípidos (no ACC-asa)

El tiobencarbo o bentiocarbo (tiocarbamato) es un herbicida selectivo que se aplica en preemergencia o en posemergencia temprana para el control de gramíneas, de ciperáceas y de algunas especies de hoja ancha. Es absorbido por las raicillas, la plúmula, el tallo, las hojas y, principalmente, a través del mesocótilo (Figura 14). Su traslocación es acropétala

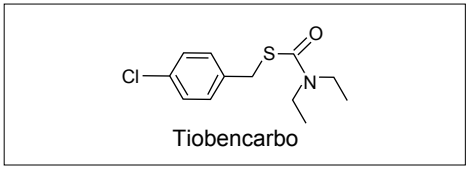


Figura 14. Un herbicida selectivo del arroz que es absorbido por las estructuras primigenias de las plántulas de las malezas.

(vía xilema, de la base hacia el ápice). Su efecto se observa de 5 a 8 días después de la aplicación.

El arroz lo metaboliza completamente. Es fuertemente adsorbido por los coloides del suelo y también lo degradan los microorganismos. Su vida media varía de 30 a 60 días.

Aunque el sitio específico en que actúa en las malezas no se ha identificado, se postula una inhibición de la síntesis de lípidos en un sitio diferente a aquél en que actúa la ACC-asa. Se conocen también otras respuestas bioquímicas a su acción relacionadas con la inhibición de la síntesis de proteínas, de isoprenoides y de flavonoides.

De todos los biotipos resistentes a herbicidas en el mundo, el 3% corresponde actualmente al mecanismo de acción postulado.

Auxinas sintéticas

Hay compuestos catalogados en varias familias químicas que causan en las plantas los síntomas siguientes:

- Crecimiento anormal de raíces y tallos.
- Epinastia, elongación y entorchamiento de las hojas.
- Siguen a éstos la inhibición del crecimiento y la clorosis de la planta y, finalmente, la necrosis de sus tejidos.

Estos productos se aplican como un tratamiento foliar para el control de malezas de hoja ancha en cultivos de gramíneas, aunque también pueden ser absorbidos por las raíces.

En la familia de los ácidos fenoxicarboxílicos está el herbicida 2,4-D; en la de los ácidos piridincarboxílicos están las mezclas formuladas de picloram+2,4-D y de propanil+triclopir; y en la de los ácidos quinolincarboxílicos aparece el quinclorac (Figura 15).

Características

Se traslocan fácilmente por el floema y el xilema, aunque en dosis altas actúan como herbicidas de contacto y así su traslocación decrece. Cuando se aplican en dosis muy bajas, se convierten en reguladores del crecimiento, como las auxinas, se acumulan en los puntos de crecimiento, y generan en la planta respuestas positivas.

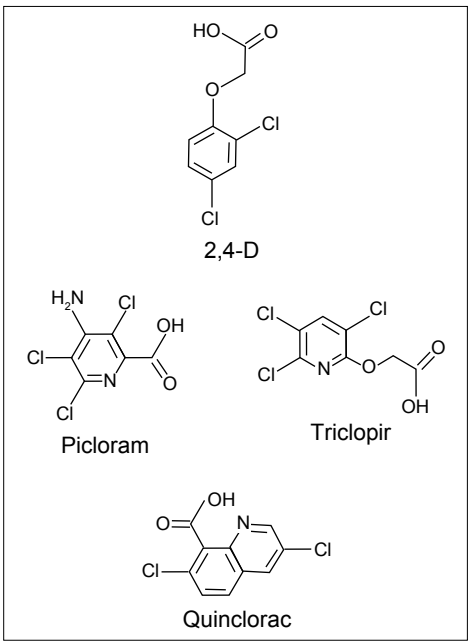


Figura 15. Cuatro auxinas sintéticas pertenecientes a tres familias de ácidos carboxílicos.

El mecanismo de acción de estos herbicidas no está aún completamente definido. Se sabe que afecta la plasticidad de la pared celular; que incrementa la acción de la polimerasa del ARN; que aumenta el ADN, el ARN y la síntesis de proteínas; y que estimula la producción de etileno. De todos los biotipos resistentes de que se ha recibido información, el 9% lo son para este mecanismo de acción.

El quinclorac puede aplicarse también en preemergencia. Este producto controla ciertas gramíneas afectando una enzima asociada con la biosíntesis de la celulosa que conforma la pared celular. En los biotipos resistentes, esta enzima está alterada.

Degradación

Estos compuestos son metabolizados lentamente, dentro de la planta, por hidrólisis y por conjugación con otros compuestos. En el suelo se degradan rápidamente si la temperatura y la humedad son altas.

Referencias bibliográficas

Clavijo, J. 1999. Mecanismo de acción de nuevos herbicidas. In: Actualización en malherbología; Curso y precongreso. Memorias del XIV Congreso ALAM y XXIX Congreso COMALFI celebrados en Cartagena, Colombia, en agosto de 1999. Bogotá, Colombia. p. 38-40.

Clavijo, J. 2000. Modo y mecanismo de acción de los herbicidas. Revista Ventana al Campo Tropical (Colombia) 3(1):5-9. [Disponible también en: Robayo, G. (ed.). Herbicidas 2000 y medio ambiente. COMALFI, Bogotá, Colombia].

Clavijo, J. 2001. Herbicidas inhibidores de la ALS y el problema de las malezas en arroz. Revista COMALFI (Colombia) 28(1):17-29.

Dusky, J.; Tredaway, J. 2000. Weeds in the sunshine: Weed management in rice. SS-A 10. Cooperative Extension Service, University of Florida. 4 p.

Edifarm. 2004. Vademecum arrocero 2004. 1a. ed. Bogotá, Colombia. 424 p.

Federación Nacional de Arroceros de Colombia (Fedearroz). 2000. Segundo censo nacional arrocero. División de Investigaciones Económicas. Bogotá, Colombia. 197 p.

Fuentes, C. 1997. Los herbicidas sulfonilureas: Actividad biológica y modo de acción. Revista COMALFI (Colombia) 24(1-2):37-67.

HRAC (Herbicide Resistance Action Committee). 2003. Classification of herbicides according to mode of action. Consultado enero 15 de 2005 en: www.plantprotection.org/hrac

ICA (Instituto Colombiano Agropecuario). 2005. Lista de herbicidas registrados para arroz. División de Insumos Agrícolas. Bogotá, Colombia. 4 p.

Iowa State University Extension Service. 2004. Herbicide manual for agricultural professionals: Herbicide site of action and injury. Ames, IO, EE.UU. p. 38-42. Disponible también en: www.weeds.iastate.edu

Martin, H. 2004. Herbicide mode of action categories. Ministry of Agriculture and Food, Ontario. Canadá. 13 p. Disponible también en: www.omafra.gov.on.ca/english/crops/facts/00-061.htm

Powles, S.; Holtum, J. (eds.). 1994. Herbicide resistance in plants: Biology and biochemistry. Lewis Publishers, Boca Raton, FL, EE.UU. 353 p.

Puentes, B. 2004. Modo de acción en los herbicidas: Arrocero moderno con el mejor entorno ambiental. Revista Ventana al Campo Tropical (Colombia) 1-3:103-104.

Weed Science Society of America. 2002. Herbicide handbook. 8a. ed. Urbana, IL, EE.UU. 400 p.

Capítulo 24

Resistencia a herbicidas en malezas asociadas con arroz

Albert Fischer
Bernal E. Valverde

Contenido

	Página
Resumen	447
Abstract	448
Introducción	449
Definiciones	449
Historia de la resistencia a los herbicidas	451
Resistencia a dos inhibidores de enzimas	451
Resistencia a los herbicidas usados en arroz	452
Riesgo de evolución hacia la resistencia	455
Por factores relativos a la biología de la maleza	455
Por factores relativos al herbicida y a su uso	460
Mecanismos de resistencia	461
Detección y confirmación de la resistencia	465
Preguntas clave en el diagnóstico de la resistencia	465
Inspección de campo	468
Confirmación experimental de la resistencia	468
Prevención y manejo de la resistencia	469
Prevención	471
Manejo agronómico	471
Uso de herbicidas	476
Predicción de la evolución hacia la resistencia	481
Conclusiones	484
Referencias bibliográficas	484

Resumen

Se analizan los factores que determinan la evolución de la resistencia de las malezas a los herbicidas, los criterios para detectar esa evolución y los mecanismos de resistencia de las malezas a los herbicidas; se estudian también algunos conceptos sobre la prevención de la aparición de las malezas y sobre su manejo, haciendo énfasis en el cultivo del arroz. Se indica que algunos factores causantes de pérdidas de rendimiento del arroz y de incrementos en los costos de producción y riesgo ambiental son la evolución de la

resistencia a algunos herbicidas en las poblaciones de malezas, la cual ha sido favorecida por la producción de arroz en monocultivo, la fuerte dependencia del cultivador por el control químico de las malezas y la aplicación repetida de un mismo tipo de herbicidas. Algunos factores que determinan la tasa de evolución de la resistencia de las malezas a los herbicidas son: la relación proporcional en que originalmente aparecen los individuos resistentes (los mutantes); su fecundidad y su persistencia en el banco de semillas del suelo; su adaptabilidad ecológica; su sistema de reproducción; la base genética de su resistencia y el modo en que la heredan; la toxicidad y la residualidad del herbicida; la dosis empleada del herbicida; y la frecuencia con que éste se aplica. Esta *presión de selección*, que propicia la aparición de biotipos resistentes, se reduce si se emplean secuencias o mezclas de herbicidas cuyo modo de acción y mecanismo de degradación sean diferentes. Otras prácticas, como sembrar semilla certificada libre de malezas, inspeccionar el campo y hacer pruebas de detección de biotipos resistentes, ayudan a limitar la dispersión de la resistencia. La *resistencia* de tipo metabólico y la evolución de la resistencia múltiple son un desafío al avance del cultivo que requiere una estrategia creativa y enfatiza la necesidad de practicar un control integral de malezas. Por su parte, los modelos de predicción sirven de apoyo a la investigación y permiten el diseño y la selección de programas rentables de manejo integrado. El manejo de la resistencia a los herbicidas implica una planificación a largo plazo y debe apoyarse en programas educativos.

Abstract

Resistance to herbicides in weeds associated with rice

The factors determining the evolution of resistance to herbicides in weeds are analyzed as well as the criteria used to detect this evolution and the mechanisms of resistance to herbicides in weeds. Several concepts on the prevention of the appearance of weeds and their management are discussed, with special emphasis on the rice crop. Factors causing yield losses in rice as well as increased production costs and environmental risks include the following: the evolution of the resistance to several herbicides in weed populations, which has been favored by the monocropping of rice; the strong dependence of farmers on chemical weed control; and the repeated application of the same type of herbicide. Factors determining the rate of evolution of weed resistance to herbicides are the initial frequency of resistant (mutant) individuals, their fecundity and longevity in the soil reservoir, their ecological fitness, the reproduction mode, the genetic base and mode of inheritance of the resistant trait, the toxicity and residuality of the herbicide, and herbicide dosage and frequency of use. This selection pressure, which favors the appearance of resistant weed biotypes, can be reduced by using a sequence of herbicides or by combining herbicides with different modes of action and degradation mechanisms. Other practices, such as planting weed-free certified seed, field inspection, and trials to detect resistant biotypes, help limit the dispersal of herbicide-resistant biotypes. Metabolic resistance as well as the evolution of multiple resistance represent challenges that will require creative management strategies and underscore the need for integrated weed management. Models to predict the evolution of resistance are useful research tools and allow for the design and selection of profitable integrated weed management programs. The management of the resistance to herbicides requires long-term planning and the support of educational programs.

Introducción

Un porcentaje elevado del área sembrada con arroz en el mundo está bajo el sistema de monocultivo, y por ello se han asociado al arroz malezas que comprometen seriamente su productividad. De un lado, las malezas son un problema de cuidado en los sistemas pluviales en que el arroz no se cultiva con riego de inundación. Del otro, las especies acuáticas de malezas se han adaptado al sistema de inundación reduciendo así la efectividad del agua como herramienta de control de malezas en el arroz con riego. Ahora bien, los nuevos tipos de planta de arroz de alto rendimiento no son particularmente competitivos con las malezas. En consecuencia, el arroz es, en todas sus modalidades de siembra directa, un cultivo altamente dependiente de los herbicidas. Aun en la zona arrocera de Asia, donde ha predominado el sistema de trasplante, la expansión registrada en el área de siembra directa lleva implícita la necesidad de intensificar el *control químico* de malezas.

Si el control químico es la única herramienta contra las malezas y se usan repetidamente ciertos grupos de herbicidas, se llega inevitablemente a la aparición de resistencia a los herbicidas en especies de malezas de muchas regiones. Esta resistencia complica el manejo de las malezas e incrementa su costo. Puede aumentar la *carga ambiental* de plaguicidas cuando las fallas de control incentiven a los agricultores a incrementar las dosis y el número de aplicaciones. Los herbicidas seguirán siendo un componente esencial del control de malezas, pero hay que *racionalizar* su empleo para que la evolución de la resistencia a ellos no prive a los cultivadores de un insumo muy útil.

En este capítulo se analizan los factores que determinan la evolución de la resistencia, los criterios para detectar esa evolución y los mecanismos de resistencia de las malezas a los herbicidas; se estudian también algunos conceptos sobre la prevención de la aparición de las malezas y sobre su manejo, haciendo énfasis en el cultivo del arroz.

Definiciones

Es importante tener claros los nombres con que se designan los grupos de herbicidas y las reacciones de las plantas a éstos. Aunque en la literatura científica y en las comunicaciones orales los términos resistencia y tolerancia se usan a menudo indistintamente, este capítulo se basará en la definición de ambos conceptos presentada por Valverde et al. (2000).

Resistencia

Es la capacidad hereditaria natural que tienen ***algunos biotipos de una población*** de malezas para *sobrevivir y reproducirse* después de ser tratados con un herbicida que, aplicado en condiciones normales (de ambiente y de operación), controlaría efectivamente esa población. Es importante resaltar los puntos siguientes:

- La resistencia a uno o varios herbicidas es una característica *hereditaria* de la maleza, cuya transmisión a las generaciones sucesivas depende de la naturaleza del gen o de los genes involucrados (por dominancia, seudo-dominancia o recesividad).
- La aparición de la resistencia se relaciona con la presión de selección impuesta por el *uso repetido* de un mismo herbicida.
- La especie de maleza, como tal, es afectada por el herbicida cuando éste

se aplica en la dosis recomendada, pero gracias a un *proceso evolutivo* (por selección de individuos resistentes) un grupo de biotipos de la especie sobrevive y completa su ciclo reproductivo, a pesar de la aplicación del herbicida.

Tolerancia

Es la capacidad hereditaria natural que tienen ***todas las poblaciones de una especie*** de malezas para sobrevivir y reproducirse después de ser tratadas con un herbicida; la especie como tal no es afectada por el herbicida aplicado. Hay que precisar lo siguiente:

- La tolerancia no resulta de un proceso de selección debido al uso convencional de los herbicidas.
- La *selectividad* fisiológica, es decir, la propiedad de un herbicida de afectar las malezas sin producir daño al cultivo, está asociada, justamente, con la tolerancia del cultivo comercial a ese producto.

Un buen ejemplo de tolerancia es la del cultivo del arroz al herbicida propanil.

Resistencia cruzada

Cuando una población de malezas evoluciona hacia la resistencia a un herbicida, es común encontrar que también lo hace hacia la resistencia a otros herbicidas. La resistencia cruzada es entonces la que desarrolla un biotipo de una maleza a *más de un herbicida* gracias a un ***único mecanismo*** individual de resistencia que posee. Muchas veces hay resistencia cruzada respecto a herbicidas que tienen el mismo modo de acción. Pueden citarse dos casos:

- Los biotipos de *Echinochloa colona*, que evolucionaron hacia la resistencia a los herbicidas ariloxi-fenoxi-propionatos, como el fenoxaprop, exhiben resistencia cruzada a las ciclohexanodionas, como el setoxidim.
- Hay biotipos de *Cyperus difformis*, en California, que son resistentes a la vez a bensulfurón-metilo, a penoxsulam y al imazapir, todos los cuales son inhibidores de la enzima acetolactato sintasa (ALS).

El mecanismo de resistencia de la maleza es el mismo en todos los casos y está relacionado con el modo de acción de estos herbicidas (ver más adelante).

Resistencia múltiple

Es aquella en que el biotipo resistente tiene ***dos o más mecanismos*** distintos de resistencia. En América Central se han reportado biotipos de *E. colona* resistentes a fenoxaprop-etilo y a propanil que, además, son resistentes a azimsulfurón.

Resistencia cruzada negativa

Es aquella en que un biotipo resistente a un herbicida experimenta un aumento en la susceptibilidad a otros herbicidas cuyo modo de acción o de degradación es distinto. Hay varios casos confirmados, pero ninguno es de malezas asociadas con el arroz.

Cultivos resistentes

Hay también *cultivos resistentes a herbicidas* y el arroz no es una excepción. Estos cultivos pueden ser ***transgénicos***, es decir, han sido desarrollados por transformación genética. Un ejemplo son las variedades de arroz resistentes a los herbicidas glufosinato de amonio y glifosato. Pueden haber desarrollado también esta resistencia a los herbicidas mediante ***métodos convencionales*** (no transgénicos), como las variedades resistentes a los herbicidas del grupo de las imidazolinonas, que se comercializan

con el nombre de Clearfield®. Ahora bien, la siembra de cultivos resistentes a herbicidas abre la posibilidad de que las malezas sexualmente compatibles con el cultivo adquieran esa resistencia mediante el flujo de genes o de (trans) genes provenientes del cultivo. Éste sería el caso del arroz maleza (*Oryza* spp.), conocido como arroz rojo, que es congénere (o con-específico) del arroz cultivado, puede cruzarse con el cultivo, y produciría híbridos resistentes al herbicida en cuestión.

Historia de la resistencia a los herbicidas

El primer caso de resistencia de una maleza a un herbicida (la auxina sintética o 2,4-D) se reportó en 1957; sin embargo, sólo en 1970, cuando Ryan documentó la resistencia a las triazinas que exhibía *Senecio vulgaris*, este fenómeno comenzó a ser reconocido como un problema de importancia agronómica y económica. Hasta la fecha, 65 especies de malezas han evolucionado hacia la resistencia a las triazinas y a otros inhibidores de la fotosíntesis en el fotosistema II (Heap, 2005). Se han confirmado, en el mundo, 296 biotipos resistentes a herbicidas, los cuales pertenecen a 178 especies (107 son dicotiledóneas y 71 monocotiledóneas). A continuación se describen algunos casos particulares.

Resistencia a dos inhibidores de enzimas

Hay dos grupos de herbicidas cuyos modos de acción son relativamente nuevos: los que inhiben la enzima ALS (acetolactato sintasa) y los inhibidores de la acetil coenzima-A carboxilasa (ACC-asa); ambos han aparecido para agravar el problema de la resistencia de las malezas (Figura 1). Se cuentan ya 90 especies resistentes a herbicidas que inhiben la ALS y 34 especies resistentes

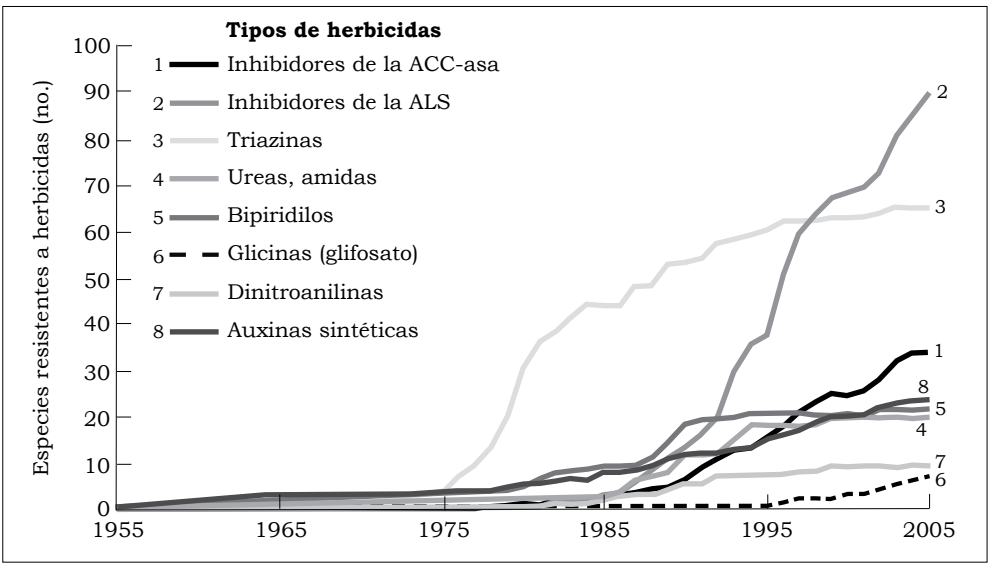


Figura 1. Evolución histórica de la resistencia de las malezas a diversos grupos de herbicidas.

FUENTE: Heap, 2005.

a herbicidas inhibidores de la ACC-asa (Heap, 2005). Herbicidas de ambos grupos se emplean en arroz:

- Entre los inhibidores de la ALS hay familias químicas conocidas como las sulfonilureas (el bensulfurón-metilo y el metsulfurón-metilo), las imidazolinonas (el imazapir y el imazapic), las triazolopirimidinas (el penoxsulam), los piridinilbenzoatos (el bispiribac-sodio, el piribenzoxim) y las sulfonilamino-carboniltriazolinonas (el flucarbazone).
- Los inhibidores de la ACC-asa incluyen las familias químicas ariloxi-fenoxi propanoatos (el fenoxaprop y el cihalofop), las ciclohexanodionas (el profoxidim y el setoxidim) y la fenilpirazolina (el pinoxadén).

Un caso muy controvertido en la actualidad es el de la resistencia al glifosato, que se ha documentado en siete especies de malezas: *Ambrosia artemisiifolia, Conyza bonariensis, C. canadensis, Eleusine indica, Lolium multiflorum, L. rigidum* y *Plantago lanceolata*; ninguna lo ha desarrollado en asocio con el cultivo del arroz.

Resistencia a los herbicidas usados en arroz

La resistencia a herbicidas empleados en el cultivo del arroz se ha presentado en casi todos los agroecosistemas de importancia económica (Valverde e Itoh, 2001). Estos casos empezaron a aparecer en la literatura científica a principios de la década de los 90 y en la actualidad comprenden 31 especies de malezas (Cuadro 1).

A inhibidores de la ALS

Esta resistencia se debe, principalmente, al uso generalizado de las *sulfonilureas* y es la más frecuente en malezas del arroz cultivado en Asia. Se conocen 20 especies de malezas resistentes a estos herbicidas, muchas de las cuales son especies acuáticas cuyo control se basó en el bensulfurón. La primera especie resistente a estos herbicidas (*Monochoria korsakowii*) se reportó en Japón en 1995; en la actualidad hay nueve en ese país. Varias malezas acuáticas desarrollaron también resistencia a los inhibidores de la ALS en algunas zonas arroceras de Europa, de Australia, de Estados Unidos y de América Latina; de éstas, tres especies (*Fimbristylis miliacea*, *Limnocharis flava* y *Sphenoclea zeylanica*) también son resistentes al 2,4-D en Asia.

Al propanil

Varias especies de *Echinochloa*, principalmente *E. colona* y *E. crus-galli*, engrosan la lista de casos de resistencia a herbicidas que tienen su propio modo de acción. Ambas especies han evolucionado hacia la resistencia al *propanil* en varias regiones del mundo. Los primeros biotipos resistentes aparecieron en Costa Rica y en Colombia. En ambos países, las poblaciones de *E. colona* expuestas durante muchos años al propanil dejaron de ser controladas eficazmente por el herbicida; más tarde se diagnosticó una resistencia al propanil en toda América Central y se reportó también en México, Venezuela y Estados Unidos. Valverde et al. (2000) describen en detalle algunos aspectos relacionados con la evolución y el manejo de *E. colona* resistente al propanil en América Central. La maleza *E. crus-galli* ha desarrollado resistencia al propanil en el sur de Estados Unidos, en Grecia, en Sri Lanka y en Tailandia.

A los tiocarbamatos y a los inhibidores de la ACC-asa

Especies del género *Echinochloa* han evolucionado también hacia la resistencia a los herbicidas *tiocarbamatos* (el

Cuadro 1. Malezas que han evolucionado hacia la resistencia a los herbicidas usados en el cultivo del arroz.[a]

Especie	Familia botánica	Ciclo de vida	Resistente a:[b]
Alisma plantago-aquatica	Alismataceae	Perenne	Sulfonilureas
Ammannia auriculata	Lythraceae	Anual	Bensulfurón
A. coccinnea	Lythraceae	Anual	Bensulfurón
Bacopa rotundifolia	Scrophulariaceae	Anual	Sulfonilureas
Cyperus difformis	Cyperaceae	Anual	Sulfonilureas Sulfonilureas, imidazolinonas y penoxsulam
Damasonium minus	Alismataceae	Perenne	Bensulfurón
Echinochloa colona	Poaceae	Anual	Propanil, fenoxaprop, quinclorac Propanil, fenoxaprop y azimsulfurón
E. crus-galli	Poaceae	Anual	Propanil, butacloro, quinclorac, ariloxifenoxipropionatos. Propanil y butacloro, butacloro y tiobencarbo, molinato y tiobencarbo
E. crus-pavonis	Poaceae	Anual	Quinclorac
E. hispidula	Poaceae	Anual	Quinclorac
E. phyllopogon (*E. oryzicola*)	Poaceae	Anual	Quinclorac
			Molinato, tiobencarbo, fenoxaprop, cihalofop, clomazone, bispiribac y penoxsulam
E. oryzoides	Poaceae	Anual	Molinato y tiobencarbo
Elatine triandra var. *pedicellata*	Elatinaceae	Anual	Sulfonilureas
Fimbristylis miliacea	Cyperaceae	Anual	2,4-D, pirazosulfurón

(Continúa)

Cuadro 1. (Continuación.)

Especie	Familia botánica	Ciclo de vida	Resistente a:[b]
Ischaemum rugosum	Poaceae	Anual	Fenoxaprop
Limnocharis flava	Butomataceae	Perenne	2,4-D, bensulfurón
Limnophila sessiliflora	Scrophulariaceae	Perenne	Sulfonilureas
Lindernia dubia sbp. *dubia, L. dubia* sbp. *major*	Scrophulariaceae	Anual	Sulfonilureas
L. micrantha	Scrophulariaceae	Anual	Sulfonilureas
L. procumbens (*L. pyxidaria*)	Scrophulariaceae	Anual	Sulfonilureas
Monochoria korsakowii	Pontederiaceae	Anual	Bensulfurón Bensulfurón y diquat
M. vaginalis	Pontederiaceae	Anual	Sulfonilureas
Rotala indica var. *uliginosa*	Lythraceae	Anual	Sulfonilureas
Sagittaria guyanensis	Alismataceae	Anual	Sulfonilureas
S. montevidensis	Alismataceae	Anual	Sulfonilureas y bispiribac
S. pygmaea	Alismataceae	Perenne	Sulfonilureas
Schoenoplectus juncoides var. *ohwianus*	Cyperaceae	Perenne	Sulfonilureas
S. maritimus	Cyperaceae	Perenne	Sulfonilureas
S. mucronatus	Cyperaceae	Perenne	Sulfonilureas Sulfonilureas, imazamox y bispiribac
Sphenoclea zeylanica	Sphenocleaceae	Anual	2,4-D

a. Este cuadro se preparó con datos de Heap (2005) y con información personal de los autores.
b. Los grupos en tipo de letra diferente indican resistencia cruzada o múltiple en los biotipos respectivos.

tiobencarbo y el molinato) y al *butaclor* (una cloroacetamida) que se emplean para controlarlas (Cuadro 1). El uso generalizado de inhibidores de la enzima ACC-asa, principalmente del fenoxaprop-etilo —que se convirtió en una excelente alternativa para controlar a *E. colona* resistente al propanil— propició la selección (y aparición) de biotipos resistentes de tales productos en varios países latinoamericanos. Recientemente se informó de resistencia a este grupo de herbicidas en *E. crus-galli* en Tailandia. *Ischaemum rugosum* también demuestra resistencia a dichos herbicidas en Colombia.

A otros herbicidas

Casi todas las especies de *Echinochloa* que afectan económicamente el arroz han evolucionado también hacia biotipos resistentes al herbicida quinclorac, del grupo de las auxinas sintéticas (Cuadro 1).

Finalmente, algunos biotipos de malezas asociadas con el arroz exhiben resistencia múltiple. Uno de los casos más importantes es el de *E. phyllopogon*, que es resistente, en California, a los herbicidas fenoxaprop, tiobencarbo, molinato, bispiribac, clomazone y penoxsulam; este caso se discute más adelante.

Riesgo de evolución hacia la resistencia

Es difícil prever el nivel de resistencia que manifestarán las malezas de un terreno o de un predio; sin embargo, si se conocen los factores involucrados en la evolución de las malezas hacia la resistencia, se dispondrá de elementos para diseñar una estrategia de manejo que permita mitigar ese proceso. Hay que estudiar, por tanto, la biología de la maleza y las características del herbicida.

Por factores relativos a la biología de la maleza

Frecuencia original de casos de resistencia

La resistencia debe considerarse como un proceso evolutivo porque implica un cambio en las frecuencias génicas de una población, que proviene de la selección a favor de ciertos genotipos. El uso repetido de un mismo tipo de herbicida conduce al incremento de la frecuencia de los alelos de resistencia en la maleza y, por lo tanto, al aumento de individuos resistentes en una población. Un prerrequisito de esta evolución hacia la resistencia es la existencia de variabilidad genética sobre la cual pueda actuar la selección. Esta variabilidad existe porque los genotipos resistentes resultan de mutaciones al azar y pueden estar presentes en una población aun antes de que ésta haya sido expuesta a la acción del herbicida.

Las mutaciones ocurren continuamente en las poblaciones naturales, pero su *frecuencia es baja*; por consiguiente, el porcentaje de individuos originalmente resistentes en una población es bajo y se calcula que está entre $1/10^4$ y $1/10^6$ (Jasieniuk et al., 1996; Jander et al., 2003). La relación proporcional (porcentaje) de individuos resistentes refleja el equilibrio que existe entre la continua generación de alelos resistentes por mutación recurrente y la sobrevivencia de los individuos que los portan. Cuando se alcanza este equilibrio, la frecuencia de individuos resistentes es superior a la tasa absoluta de mutación (Jasieniuk et al., 1996). No hay pruebas evidentes de que tales mutaciones sean inducidas necesariamente por la acción de algún herbicida, antes bien se consideran el resultado de un proceso espontáneo.

La *frecuencia inicial* de individuos resistentes es uno de los factores que

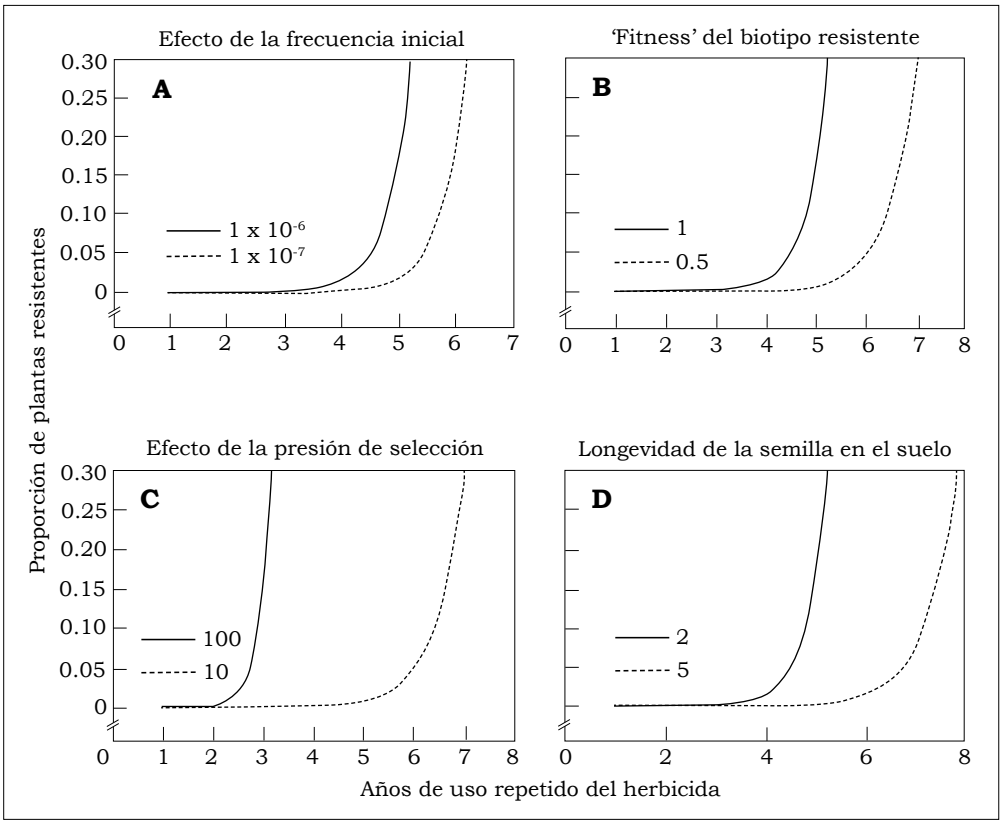


Figura 2. Cambios en la tasa de evolución de la resistencia de un biotipo de maleza a un herbicida dadas las condiciones siguientes: (A) disminuye en un orden de magnitud la frecuencia inicial de individuos resistentes; (B) se reduce a la mitad el ajuste ('fitness') del biotipo resistente; (C) se cambia el herbicida que controla el 99% de individuos susceptibles al que controla el 90% y que no afecta a los biotipos resistentes; (D) aumenta la longevidad de las semillas del banco de semilla del suelo de 2 a 5 años. Parámetros iniciales (curva sólida): frecuencia inicial = 1 x 10^{-6}; ajuste ecológico ('fitness') del biotipo resistente = 1; presión de selección = 20 (95% control de biotipos susceptibles y ninguno resistente); longevidad de la semilla en el suelo = 2 años. En cada cuadro de la figura (A, B, C y D) se conservaron estos valores, excepto el valor que correspondía al parámetro analizado en ese cuadro. Estas gráficas, basadas en el modelo de Gressel y Segel (1990), se calcularon hasta alcanzar un 30% de individuos resistentes, porque a este valor la resistencia al herbicida debería hacerse evidente en el campo. En las ordenadas: Proporción = relación proporcional respecto a la unidad.

determinan el número de generaciones de selección necesarias para que una población alcance un nivel de resistencia que cause problemas (Figura 2,A). La resistencia de una maleza a un herbicida empieza a advertirse en el campo cuando más del 30% de los individuos de la población de esa maleza es resistente.

Fecundidad

La frecuencia original de resistencia puede asegurar la *presencia de*

individuos resistentes en un arrozal, si se dan dos condiciones (sobre todo la segunda):

- La densidad de infestación es alta.
- La especie de maleza produce mucha semilla y logra más de una generación reproductiva por año.

Persistencia del banco de semillas

Si un herbicida elimina todos los individuos susceptibles dejando unos pocos sobrevivientes resistentes que pueden producir semillas, la frecuencia de individuos resistentes presentes en el siguiente ciclo de cultivo dependerá de la cantidad de *semilla resistente* que se produjo y de la cantidad de semilla susceptible que se encuentre en el banco o reserva de semillas del suelo. Los individuos susceptibles que emerjan del banco de semillas del suelo 'diluirán' la frecuencia de individuos resistentes que provengan de la semilla producida por los resistentes que sobrevivieron al ciclo anterior. El efecto de dilución será más intenso y relevante en especies de malezas cuya semilla tenga *latencia* y sea de longevidad considerable en el suelo; tal es el caso de muchas especies cuyas semillas tienen un tegumento grueso.

Por el contrario, las especies que produzcan semilla de latencia breve o que no la tengan y cuya longevidad sea corta en el suelo serán las que incrementen más rápidamente su frecuencia de individuos resistentes a los herbicidas de uso repetido. Esas características se encuentran, muchas veces, en las especies de *Echinochloa* que han evolucionado hacia la resistencia a diversos herbicidas en numerosos ecosistemas propios del arroz.

Adaptabilidad ecológica

La frecuencia inicial de individuos resistentes a herbicidas en una población tiende a ser más baja si la mutación que confiere esa resistencia tiene un efecto pleiotrópico (afecta más de una característica) sobre el éxito ecológico de esos individuos, éxito que se mide como el tamaño final de su descendencia ya establecida. Esta merma de adaptabilidad ecológica o de ajuste ecológico ('fitness') se ha detectado claramente en varios biotipos resistentes a las triazinas, un grupo de herbicidas que inhiben el fotosistema II (Gressel y Segel, 1990), por lo siguiente: la mutación que confiere la resistencia reduce la eficiencia de la transferencia de electrones hacia la plastoquinona, en la fase lumínica de la fotosíntesis (captación de luz), y afecta, por tanto, el rendimiento cuántico (más fotones) en la fijación fotosintética del CO_2. En consecuencia, las plantas *resistentes son más débiles*, y tienen una tasa de crecimiento y un grado de fecundidad más bajos que las plantas normales (susceptibles al herbicida). Ahora bien, esta reducción de ajuste ('fitness') se ha detectado muy pocas veces y de modo poco coherente respecto a otros herbicidas (Figura 2,B). Es posible que las diferencias entre biotipos susceptibles y resistentes a otros herbicidas sean más sutiles y requieran de métodos más precisos para ser detectadas.

La evolución hacia la resistencia a los herbicidas inhibidores de la enzima ALS suele ser rápida, y se ha notado que la frecuencia original de estos individuos resistentes, en las poblaciones de plantas no tratadas, es comparativamente alta. Una posible razón de esta frecuencia es que la resistencia a los inhibidores de la enzima ALS no suele acarrear desventajas serias respecto a la sobrevivencia y a la reproducción.

Fundamento genético

La base genética de la resistencia al herbicida, el modo en que la planta la hereda y el tipo de reproducción de las especies de malezas son aspectos relevantes de la evolución y dispersión de esa resistencia.

Según el tipo y ***condición de los genes*** que controlan la resistencia, ésta puede distribuirse así:

- La resistencia del *sitio en que actúa* el herbicida ('sitio activo', ver más adelante) suele estar gobernada por el par de alelos de un gen principal de origen nuclear. El alelo resistente puede ser dominante, semidominante o recesivo. Un ejemplo de gen dominante es la resistencia al paraquat de la maleza *Erigeron canadensis* (Moss, 2002).
- La resistencia a *inhibidores de las enzimas* ALS y ACC-asa suele involucrar genes nucleares dominantes o de dominancia incompleta.
- La resistencia conferida por un *gen dominante* de origen nuclear se propaga rápidamente en las especies *alógamas* (de fecundación cruzada) porque la dispersión del polen ayuda mucho al flujo genético de la resistencia en la población y esparce la resistencia en otras poblaciones de la maleza. En cambio, la fecundación cruzada no favorece la expresión ni la propagación de la resistencia conferida por genes recesivos, porque esa expresión quedará oculta por las frecuencias más altas de los individuos heterocigotos.
- La resistencia gobernada por *genes recesivos* se propaga mejor en las especies *autógamas*; por ejemplo, en *Setaria viridis* (Jasieniuk et al., 1996). Esta resistencia es muy rara; un ejemplo es la de *Setaria viridis* a la trifluralina, que es controlada por un par de alelos recesivos. En especies en que la autopolinización es muy intensa, los alelos mutantes recesivos se propagan casi tan rápidamente como los dominantes (Jasieniuk et al., 1996).
- La resistencia a las triazinas es un ejemplo de *herencia materna* (o citoplásmica) conferida por el ADN del cloroplasto. Los cloroplastos se heredan desde el óvulo materno; por tanto, este tipo de resistencia no se transfiere por polen, salvo en casos muy raros. El flujo genético que propague esta resistencia se apoyará en la dispersión de las semillas. La inmigración de genes de susceptibilidad al herbicida, provenientes de polen de poblaciones vecinas o del banco de semillas, no reducirá la tasa de evolución hacia la resistencia, puesto que no hay recombinación genética en este tipo de herencia.
  Esta condición sirve más bien para evaluar el riesgo de transferencia de genes de resistencia desde cultivos que poseen resistencia genética a los herbicidas. Por ejemplo, si el agricultor vecino cultiva una variedad de maíz que tiene resistencia genética a la atrazina en el sitio de acción del herbicida, no se corre un riesgo grande de que este gen se transfiera a plantas de maíz silvestre del propio campo. Ahora bien, cuando se trata de resistencia a un inhibidor de la ALS en el sitio de acción del herbicida, este gen nuclear, dominante o semidominante, se propagaría rápidamente a las poblaciones vecinas de maíz silvestre. Por la misma razón, si la maleza es de polinización cruzada, la inmigración de polen resistente desde las fincas vecinas crea, ciertamente, un problema si la resistencia está controlada por genes nucleares dominantes. Con excepción de la resistencia a las triazinas, la resistencia de las malezas a los herbicidas está determinada por genes nucleares.
- La resistencia a los herbicidas puede ser también *poligénica*, y en ella cada gen contribuye con un efecto menor. Varias mutaciones menores o amplificaciones (replicación de genes) pueden acumularse dando lugar a un

incremento gradual de la resistencia en los individuos. Este control genético aparece, generalmente, cuando la resistencia se debe a una elevada capacidad metabólica de la maleza para desintoxicarse de los herbicidas (ver más adelante).

La resistencia a los herbicidas puede ***evolucionar*** de diversas maneras, según la condición genética antes descrita:

- La evolución es *rápida* si la resistencia consiste en una alteración del sitio en que actúa el herbicida (sitio activo), alteración que se recibe, generalmente, por herencia monogénica. La evolución de esta resistencia *se acelera* cuando el herbicida es altamente fitotóxico (como ocurre con los inhibidores de la ALS) o se aplica en dosis elevadas. La razón es que casi todos los individuos sobrevivientes que pasen a la próxima generación serán portadores del gen de resistencia, dado que la *presión de selección* a favor de la resistencia será máxima.
- La evolución es *lenta*, en cambio, si se aplican dosis bajas de un herbicida o herbicidas poco letales: el resultado es que un mayor número de individuos susceptibles sobreviven y producirán semilla, lo que diluirá el avance de la selección por resistencia (ya que, además, la presión de selección es baja). Por tanto, una forma efectiva de *retrasar* la evolución hacia la resistencia basada en el sitio activo es aplicar dosis bajas del herbicida, reduciendo así la presión de selección.
- La evolución hacia la resistencia es muy diferente y *mucho más lenta* si está controlada por *varios genes*. En este caso, una dosis baja del herbicida, que eliminaría al biotipo susceptible, podría permitir la supervivencia de individuos poseedores de algunos genes de resistencia parcial al herbicida. Estos sobrevivientes podrían intercambiar genes de resistencia o acumularlos, o dispondrían de tiempo para que algunos de esos genes de efectos menores se dupliquen o se amplifiquen. El resultado sería, pasado cierto tiempo, un aumento del nivel de resistencia individual de ciertos genotipos, cuya frecuencia aumentará dada la presión de selección que ejerce el herbicida.

  Este tipo de evolución podría impedirse con dosis elevadas de un herbicida o con herbicidas muy tóxicos, aplicándolas ***antes*** de que la mayoría de los individuos de la maleza haya tenido la oportunidad de acumular suficiente cantidad de alelos de resistencia como para sobrevivir al nuevo tratamiento con herbicidas. El empleo de herbicidas en la dosis recomendada no debería favorecer la resistencia poligénica, pero la realidad es diferente: los casos de *resistencia metabólica* —que están probablemente bajo el control de *poligenes*— abundan cada vez más. Conviene, por tanto, tener en cuenta los hechos siguientes:

  - Las malezas no emergen todas al mismo tiempo y siempre hay *plantas más grandes* que otras al momento de la aplicación de un herbicida; para éstas, la dosis será subóptima y las que porten genes de resistencia marginal sobrevivirán.
  - Las plantas de maleza que *emergen tardíamente* reaccionan de modo similar porque la residualidad de los herbicidas aplicados al suelo disminuye gradualmente.
  - La resistencia observada en *E. phyllopogon* y *E. oryzoides* en los arrozales de California, que es de tipo metabólico, incluye

probablemente diversas *isoenzimas de detoxificación*, que estarían controladas por varios genes individuales (resistencia poligénica) o habrían resultado de duplicaciones de genes en un mismo cromosoma. Esta resistencia evolucionó luego de décadas de uso de herbicidas tiocarbamatos cuya 'ventana de aplicación' es estrecha y lleva, por ello, al agricultor a aplicarlos tardíamente con frecuencia. Las malezas pueden absorber los herbicidas carbamatos desde el suelo; por ello, las plantas de emergencia tardía estarán expuestas a un nivel del herbicida comparable con las dosis bajas. Ahora bien, la emergencia escalonada de estas especies es un hecho comprobado en los arrozales, especialmente cuando el nivel del agua de inundación no es constante. Puede especularse que estos factores habrían contribuido a la evolución gradual de resistencia poligénica en las poblaciones de esas malezas, tal como se discutió anteriormente.

Por factores relativos al herbicida y a su uso

Presión de selección

La presión de selección es el factor más importante que determina las tasas de evolución hacia la resistencia; se refiere a la relación proporcional de individuos resistentes y susceptibles que quedan después de tratar con un herbicida una población de malezas. Esta presión de selección deriva de los siguientes atributos del herbicida:

1. ***Toxicidad fuerte*** del herbicida. Si la especie de maleza es muy susceptible, el herbicida tóxico tiene capacidad para eliminar a todas las plantas susceptibles, dejando sólo algunos individuos resistentes como sobrevivientes.
2. ***Dosis elevada*** del herbicida. Causa el mismo efecto que 1.
3. Un solo ***sitio de acción*** del herbicida en el metabolismo de la maleza. La presión hacia una sola mutación en un gen principal conferirá resistencia a la maleza con más facilidad. Por esta razón, los inhibidores de la ALS y los que inhiben la ACC-asa se consideran herbicidas de riesgo elevado. La probabilidad de que ocurran al mismo tiempo varias mutaciones en genes que regulan diferentes sitios de acción del herbicida en la maleza, para que ésta sea resistente al herbicida, es mucho menor; tal es el caso de los herbicidas que tienen un modo de acción complejo, por lo cual se llaman de 'bajo riesgo'.
4. ***Efecto residual*** prolongado del herbicida. Si la presión de selección se ejerce durante más tiempo, afecta un número más alto de individuos; aumenta, por tanto, la probabilidad de que aparezcan por selección mutantes resistentes.
5. ***Uso frecuente*** del herbicida. Las aplicaciones repetidas, ciclo tras ciclo, de un herbicida incrementan la probabilidad de que aparezcan, por selección, mutantes resistentes.

En resumen:

el uso frecuente durante un ciclo de cultivo del arroz —y sobre todo en ciclos consecutivos (incluyendo los de otros cultivos)— de herbicidas altamente eficaces, que tengan el mismo modo de acción en la planta (o ésta se detoxifique a través del mismo mecanismo bioquímico), favorece la proliferación de biotipos individuales genéticamente capacitados para sobrevivir a la acción del herbicida.

Por consiguiente, es muy importante conocer el modo de acción de los herbicidas y evitar su uso reiterado en un mismo arrozal. Esta recomendación es válida también para los herbicidas considerados de bajo riesgo, como los tiocarbamatos (Cuadro 2). En efecto, el uso prolongado de herbicidas de este grupo químico en California ha 'seleccionado' biotipos resistentes al molinato y al tiobencarbo en todas las especies de *Echinochloa* (*E. phyllopogon*, *E. oryzoides* y *E. crus-galli*) que causan daños importantes al arroz. Éste es uno de los casos que destaca la eficacia de la presión de selección debida al uso repetido de un mismo tipo de herbicida.

Las especies de malezas que tienen una *germinación escalonada* expondrán un mayor número de plantas a la acción de un herbicida, si éste es persistente; la presión de selección que reciben esas plantas será, por tanto, elevada. En cambio, si las plantas de la maleza emergen de manera simultánea y el herbicida se aplica después de que éstas hayan emergido, el efecto residual del herbicida no incrementará la presión de selección, porque todas las plantas han sido expuestas de una sola vez al herbicida. Este caso corresponde a herbicidas de acción foliar que tengan, además, efecto residual.

Herencia

La discusión sobre la herencia monogénica y la poligénica en relación con la dosis alta o baja del herbicida indicó que, en general, no existe un conocimiento previo de los tipos de control genético de la resistencia a los herbicidas que posee una población de malezas. Por consiguiente, la recomendación práctica tiene dos partes:

- Primera, aplicar los herbicidas en dosis que permitan obtener un control eficaz de las malezas sin que favorezcan la evolución hacia la resistencia poligénica.
- Segunda, asegurarse de eliminar, con otro herbicida para el cual no haya malezas resistentes en ese lugar o mediante una técnica de manejo del cultivo, todas las plantas de malezas que pudieran haber sobrevivido al tratamiento inicial.

Conviene mencionar, finalmente, que muchos investigadores y agrónomos no aconsejarían el uso de 'umbrales de infestación' como estrategia de control de las malezas con herbicidas, en lugares donde se ha diagnosticado la resistencia a algunos de estos productos. Esta estrategia tiene dos riesgos:

- Permite que los individuos resistentes presentes en la población de malezas, cuyo nivel de infestación esté por debajo del umbral, produzcan semillas.
- Da ocasión, además, a los que tienen resistencia marginal para que acumulen genes menores de resistencia poligénica por cruzamiento libre entre todos.

Mecanismos de resistencia

Los dos mecanismos principales que emplean las malezas para tornarse resistentes a los herbicidas son: un cambio en el sitio en que actúa el herbicida (sitio de acción) y una aceleración del metabolismo de la planta o degradación rápida del herbicida dentro de ella. Existen algunos casos en que el transporte limitado o el 'secuestro' del herbicida forman parte de la resistencia a éste. Este último mecanismo se ha propuesto para el paraquat. Cuando una maleza posee resistencia múltiple, opera en ella más de un mecanismo: es el caso en que dos mutaciones independientes afectan distintos sitios de acción de los herbicidas.

Cuadro 2. Herbicidas registrados para uso selectivo en el cultivo de arroz.

Modo de acción (proceso o enzima afectado en la planta)	Herbicida (nombre técnico)	Grupo químico	Riesgo de resistencia[1]
ACC sintasa[2]	Quinclorac	Quinolecarboxilico	Intermedio
ACC-asa[3]	Clodinafop-propargilo	Ariloxifenoxipropionato	Alto
ACC-asa	Cihalofop-butilo	Ariloxifenoxipropionato	Alto
ACC-asa	Fenoxaprop-*p*-etilo	Ariloxifenoxipropionato	Alto
ACC-asa	Setoxidim	Ciclohexanodiona	Alto
ACC-asa	Profoxidim	Ciclohexanodiona	Alto
ALS[4]	Bensulfurón-metilo	Sulfonilurea	Alto
ALS	Penoxsulam	Triazolopirimidina	Bajo
ALS	Bispiribac-sódico	Pirimidiniloxibenzoato	Alto
ALS	Cinosulfurón	Sulfonilurea	Alto
ALS	Ciclosulfamurón	Sulfamoilurea	Alto
ALS	Etoxisulfurón	Sulfonilurea	Alto
ALS	Halosulfurón-metilo	Sulfonilurea	Alto
ALS	Imazosulfurón	Sulfonilurea	Alto
ALS	Iodosulfurón	Sulfonilurea	Alto
ALS	Metsulfurón-metilo	Sulfonilurea	Alto
ALS	Pirazosulfurón	Sulfonilurea	Alto
ALS	Piribenzoxim	Pirimidiniloxibenzoato	Alto
ALS	Piriftalid	Pirimidiniltiobenzoato	Alto
ALS	Piriminobac-metilo	Pirimidiniloxibenzoato	Alto
ALS	Trifensulfurón	Sulfonilurea	Alto
ALS	Azimsulfurón	Sulfonilurea	Alto
Carotenoides, HPPD[5]	Benzofenap	Pirazol	Bajo
Efecto auxínico	Clomeprop	Fenoxicarboxilato	Bajo
Efecto auxínico	2,4-D	Fenoxicarboxilato	Intermedio
Efecto auxínico	MCPA[8]	Fenoxicarboxilato	Bajo
Desconocido	Oxaziclomefone	Oxazinona	Desconocido
Efecto auxínico	Triclopir	Piridincarboxilato	Bajo
Regulación de crecimiento	Hidrazida maleica	Piridazinediona	Bajo
Desconocido	Cinmetilin	Cineole	Bajo
Desconocido	Cumilurón	Fenilurea	Desconocido
Desconocido	Etobenzanid	Dicloroanilida	Desconocido
AGCML[6]	Indanofan	Indandiona	Desconocido
PPO[7]	Pentoxazone	Oxazolidinedione	Desconocido
Desconocido	Piributicarb	Tiocarbamato	Desconocido
Desconocido	Triaziflam	Triazina	Desconocido
Desconocido/división celular	Daimurón	Fenilurea	Desconocido
División celular/AGCML	Anilofos	Organofosforado	Bajo
División celular	Bromobutilo	Butiramida	Desconocido
AGCML	Butacloro	Cloroacetamida	Bajo
AGCML	Cafenstrole	Triazole	Bajo
AGCML	Fentrazamida	Tetrazolinona	Bajo

(Continúa)

Cuadro 2. (Continuación.)

Modo de acción (proceso o enzima afectado en la planta)	Herbicida (nombre técnico)	Grupo químico	Riesgo de resistencia[1]
AGCML	Flufenacet	Oxiacetamida	Bajo
AGCML	Mefenacet	Oxiacetamida	Bajo
División celular	Napropamida	Amida	Desconocido
División celular	Piperofos	Organofosforado	Bajo
AGCML	Pretilaclor	Cloroacetamida	Bajo
División celular	Tenilclor	Cloroacetamida	Bajo
Fotosistema II	Bentazona	Benzotiadiazinona	Bajo
Fotosistema II	Dimetametrina	Triazina	Bajo
Fotosistema II	Ioxinil	Nitrilo	Bajo
Fotosistema II	Propanil	Amida	Alto
Fotosistema II	Simetrina	Triazina	Bajo
HPPD	Pirazolinato	Pirazole	Desconocido
HPPD	Pirazofen	Pirazole	Desconocido
Microrúbulos	Ditiopir	Piridina	Intermedio
Microtúbulos	Butamifos	Organofosforado	Bajo
Microtúbulos	Butralín	Dinitroanilina	Bajo
Microtúbulos	Flucloralina	Dinitroanilina	Intermedio
Microtúbulos	Pendimetalina	Dinitroalina	Intermedio
Microtúbulos	Tiazopir	Piridina	Intermedio
PPO	Carfentrazone	Triazolinona	Bajo
PPO	Clometoxifen	Difeniléter	Bajo
PPO	Fluoroglicofeno	Difeniléter	Bajo
PPO	Oxadiargil	Oxadiazole	Bajo
PPO	Oxadiazón	Oxadiazole	Bajo
PPO	Oxifluorfen	Difeniléter	Bajo
PPO	Bifenox	Difeniléter	Bajo
Síntesis de carotenoides	Clomazone	Isoxazolidinona	Bajo
Síntesis de lípidos	Benfuresato	Benzofurano	Bajo
Síntesis de lípidos	Dimepiperato	Tiocarbamato	Bajo
Síntesis de lípidos	Esprocarbo	Tiocarbamato	Bajo
Síntesis de lípidos	Molinato	Tiocarbamato	Bajo
Síntesis de lípidos	Tiobencarbo	Tiocarbamato	Intermedio
Síntesis de lípidos	Tiocarbazil	Tiocarbamato	Desconocido

1. Establecido según la experiencia de los autores o inferido del modo de acción y del grupo químico del herbicida.
2. Sintasa (sintetasa) del ácido-1-aminociclopropano-1-carboxílico.
3. Acetil CoA carboxilasa.
4. Sintetasa del acetolactato.
5. 4-hidroxifenil-piruvato-dioxigenasa.
6. Ácidos grasos de cadena muy larga.
7. Protox o protoporfirinógeno oxidasa.
8. Ácido 2-metil-4-cloro-fenoxiacético.

FUENTE: El material de este cuadro ha sido compilado de diversas fuentes y adaptado de Valverde et al. (2000). Es posible que algunos productos de muy reciente desarrollo no aparezcan en esta lista.

Sitio de acción

La modificación del sitio en que el herbicida actúa en la planta (sitio de acción) es responsable de la mayoría de los casos de resistencia a los inhibidores de la ALS. Una de las mutaciones más frecuentes es la sustitución del aminoácido prolina, en la posición 197 de la enzima ALS, por otro aminoácido. El cambio de prolina por glicina, serina o alanina le confiere resistencia, respectivamente, a *Lindernia micrantha*, a *L. procumbens* y a *L. dubia* var. *major* (Uchino y Watanabe, 1999). En *Schoenoplectus juncoides,* la prolina es sustituida por leucina (Shibuya et al., 1999). Según la especie involucrada, la resistencia al grupo de herbicidas que actúa en este sitio es dominante, con dominancia incompleta o aditiva. En *L. micrantha* y *M. korsakowii*, la resistencia a los inhibidores de la ALS está determinada por un gen nuclear dominante (Itoh et al., 1999, Wang et al., 1998). De manera similar, la mayoría de las malezas gramíneas resistentes a los herbicidas que inhiben la enzima ACC-asa (responsable del primer paso clave en la síntesis de ácidos grasos), han alterado, por mutación, los genes que gobiernan ese sitio de acción.

Metabolismo del herbicida

La resistencia basada en el metabolismo del herbicida en la planta se manifiesta en algunas especies del género *Echinochloa* que resisten el propanil; el mecanismo de acción de este herbicida es la inhibición del transporte fotosintético de electrones (fotosistema II o FS-II). Es un hecho conocido que el propanil es selectivo del arroz (es decir, el arroz ***tolera*** el propanil), porque en las plantas de arroz la enzima aril-acil amidasa (AAA-asa), encargada de hidrolizar el herbicida, es muy activa. El producto de esta hidrólisis, la 3,4-dicloroanilina, se conjuga más adelante con azúcares o es incorporada a la lignina, y pierde toda la actividad fitotóxica del herbicida. En cambio, en varias especies de malezas, entre ellas las poblaciones susceptibles de *E. colon*a y *E. crus-galli*, la actividad de la AAA-asa es muy baja o inexistente.

El mecanismo de resistencia a los inhibidores del FS-II, que más comúnmente desarrollan las malezas, consiste en una mutación de los genes que controlan el sitio de acción (el FS-II); en cambio, en las especies de *Echinochloa*, la resistencia al propanil (un inhibidor del FS-II) se debe a un incremento en la actividad de la AAA-asa. Ocurre aquí una interesante coincidencia: el mismo mecanismo que confiere tolerancia al arroz otorga resistencia a los biotipos de malezas del arroz del género *Echinochloa*, gracias a la selección que hizo en ellas el uso persistente del propanil. Valverde et al. (2000) discuten en detalle los aspectos más relevantes de la resistencia al propanil de *E. colona*, y su manejo.

Mecanismos en estudio

El mecanismo con que las malezas resisten el butaclor, una cloroacetamida que inhibe la mitosis, no se ha dilucidado todavía. No se ha esclarecido tampoco el mecanismo de resistencia a dos herbicidas tiocarbamatos (tiobencarbo y molinato), aunque posiblemente interviene en ellos la degradación acelerada del herbicida (Yun et al., 2005). El mecanismo de resistencia de las malezas al herbicida auxínico 2,4-D también se desconoce, a pesar de los esfuerzos hechos para determinarlo en varias especies. El quinclorac posee también efectos auxínicos en las malezas y su acción en las especies susceptibles de *Echinochloa* se traduce en la acumulación de cianuro tóxico. Ahora bien, en los biotipos resistentes de *Echinochloa* que se han estudiado, así como en el arroz, el cianuro no se acumula en los tejidos de las plantas, que se libran así del daño del herbicida (Grossmann y Kwiatkowski, 2000).

Múltiple mecanismo

Cuando una maleza presenta resistencia a muchos herbicidas, está expresando varios mecanismos de resistencia. El caso más connotado en el cultivo del arroz es la maleza *E. phyllopogon*, que resiste el fenoxaprop, el tiobencarbo, el molinato, el bispiribac, el clomazone y el penoxsulam. Esta resistencia es de tipo metabólico y consiste en una degradación oxidativa de los herbicidas, en la que intervienen enzimas monoxidasas del tipo del citocromo P450 (Osuna et al., 2002; Yun et al., 2005). Si bien el proceso de degradación oxidativa es uno solo, es probable que intervengan en él varias isoenzimas inducibles cuyo grado de especificidad varía respecto a cada herbicida. Lo que no está claro es si todas estas monoxidasas están sujetas al control de genes individuales (es decir, intervienen varios genes) o si se trata de una sola mutación que genera una expresión colectiva de actividad enzimática muy alta frente a los herbicidas.

Mientras no se comprenda claramente el control genético de esta resistencia y se dilucide la naturaleza del proceso evolutivo que la generó, será difícil tipificarla como resistencia cruzada —es decir, la que exhibe un solo mecanismo que se opone a todos los herbicidas— o como resistencia múltiple—la que acumula distintos genes de resistencia que provienen de diferentes eventos en que hubo presión de selección. Quizás sea lo más adecuado considerarla como una *resistencia multifactorial* que pudo resultar de una acumulación gradual de genes menores o de procesos de duplicación y amplificación de genes. Por otra parte, la resistencia a fenoxaprop podría involucrar un sistema enzimático diferente. En California, *E. oryzoides* y *E. crus-galli* exhiben patrones de resistencia similares a los de *E. phyllopogon,* aunque en un nivel de resistencia más bajo.

Detección y confirmación de la resistencia

El diagnóstico de resistencia de una especie de malezas a un herbicida en el campo no se hace, normalmente, antes de que un agricultor presente un reclamo por la falta de eficacia del herbicida que había aplicado. La experiencia y los conocimientos del agricultor le permiten prever el grado de control que obtendrá con ese herbicida, pero difícilmente detectará la presencia de individuos resistentes al producto hasta que la pérdida de eficacia de éste sea notoria. Presentado el reclamo —ante un agente de extensión o un representante de ventas de la compañía proveedora del agroquímico— se inicia un debate para conocer la causa de la falla en la acción del herbicida, en el que participan varios actores:

- Para el *vendedor*, rara vez será la resistencia de la población de malezas al herbicida la primera opción; él buscará más bien la explicación en la técnica de aplicación, en el estado de los equipos, en las condiciones del tiempo atmosférico, en el momento oportuno de la aplicación, en la calidad del agua y en otras causas, con la intención de justificar el escaso desempeño del herbicida.
- Para el *técnico* agrícola, el agrónomo y el productor de arroz, la explicación estará en la valoración de una serie de aspectos y en la respuesta a varias preguntas pertinentes sobre la sospecha de resistencia al herbicida; al final, esta sospecha debe comprobarse experimentalmente.

Preguntas clave en el diagnóstico de la resistencia

El diagnóstico apropiado exige una visita al campo. El agricultor y la persona que aplicó el herbicida deben estar presentes para recibir de ellos la mayor cantidad posible de información.

1. Para descartar la explicación de que la ineficacia del herbicida se debe al **producto** como tal, se responden las siguientes preguntas:

    - ¿Se utilizó el herbicida recomendado para el control de la maleza que se considera?
    - ¿Se encontraba el herbicida en su envase original y debidamente etiquetado?
    - ¿Estaba el herbicida almacenado en condiciones apropiadas y conservaba la vigencia de su vida útil?
    - ¿Presentaba el herbicida un aspecto normal en cuanto a su densidad y su color?

2. Para valorar la calidad de la **aplicación** y descartar la ineficacia del producto porque quizás se aplicó una dosis incorrecta o el equipo estaba en mal estado o sin la debida calibración, se deben responder las siguientes preguntas:

    - ¿El equipo empleado en la aplicación del herbicida estaba debidamente lavado y en buenas condiciones? El aplicador o el agricultor difícilmente dará una respuesta negativa a esta pregunta, así que es importante verificar las condiciones en que se encuentra el equipo para inferir el tipo de cuidado y mantenimiento que se le ha dado.
    - ¿Se procedió a calibrar el equipo antes de realizar la aplicación? Si así se hizo, es necesario verificar las hojas de campo para constatar que se hicieron los cálculos apropiados y que la dosis asperjada era la correcta.
    - ¿Se utilizó agua limpia para hacer la aplicación? En caso contrario, sería recomendable tomar una muestra del agua empleada y verificar su contenido de sedimentos y su pH.
    - ¿Se adicionaron los herbicidas o componentes de la mezcla en el orden apropiado? ¿Se agregó aceite agrícola o algún coadyuvante recomendado o requerido según la etiqueta?
    - ¿Permitían las condiciones del terreno la aplicación homogénea del herbicida? En un terreno muy húmedo se dificulta el paso de los implementos agrícolas o la marcha del aplicador (si se trata de una aplicación con bomba de mochila).
    - ¿Se mantuvo la velocidad y la presión de la aplicación durante toda la operación?

3. Para verificar las **condiciones ambientales** en que se realizó la aplicación y descartarlas como causa de la pérdida de eficacia de los herbicidas, se responden las siguientes preguntas:

    - ¿Llovió durante la aplicación del herbicida o poco después?
    - ¿Tenía el suelo las condiciones apropiadas de textura y humedad? Cuando se aplican los herbicidas sobre un suelo muy seco, éste puede causar una adsorción excesiva del producto. Por el contrario, en suelos saturados de humedad, es posible que el herbicida no sea adsorbido y se pierda gran cantidad de él por escorrentía o por evaporación. Los suelos mal preparados en que hay terrones grandes no permiten la acción eficaz de los herbicidas preemergentes, como la pendimetalina.
    - ¿Se realizó la aplicación con viento en calma o con viento fuerte? Las pérdidas de herbicida por deriva o arrastre cuando la velocidad del viento es considerable, especialmente si la aplicación es aérea, pueden ser cuantiosas. Según el herbicida y su formulación, también sería importante considerar

la temperatura del medio cuando se hizo la aspersión.

4. Para valorar las condiciones en que se encontraban el **cultivo** y las **malezas** se hacen las siguientes preguntas:

   - ¿En qué estado de crecimiento se encontraban las malezas? Los herbicidas, en general, son más eficaces cuando se aplican a plántulas. Además, algunos productos preemergentes tienen una actividad posemergente limitada. Por ejemplo, la eficacia de la pendimetalina se reduce severamente si el herbicida se aplica sobre plántulas de gramíneas que tienen tres o más hojas. Si el herbicida es estrictamente preemergente, la aplicación sobre plantas ya establecidas será ineficaz.
     Es importante considerar también el estado de crecimiento de la maleza en relación con el cultivo: si el cultivo ha empezado a cubrir el suelo con su follaje y la maleza se encuentra en un estado inicial de crecimiento, es posible que el cultivo retenga la mayor parte del herbicida posemergente. Puede ocurrir también que las malezas que rebrotaron de tejidos remanentes de la cosecha anterior, y se encuentren en un estado más avanzado de crecimiento que las que provienen de semillas recién germinadas, escapen a la acción del herbicida.
   - ¿Qué densidad de malezas había al momento de la aplicación y cómo se distribuía la maleza en el campo? Si la densidad de las malezas es muy alta, podría ser necesario un ajuste (incremento, en este caso) en la dosificación.
   - ¿Se aplicaron otros agroquímicos poco tiempo antes o después de la aspersión del herbicida? Es posible que haya incompatibilidad entre un agroquímico y el herbicida que se analiza si se aplican simultáneamente con el herbicida o inmediatamente antes o después de él. El manejo de la fertilización también modifica la respuesta de las malezas a los herbicidas.

5. Para valorar la posibilidad de que una población de malezas sea resistente a un herbicida, el **historial** del empleo de herbicidas en el arrozal es de vital importancia, y se conoce a través de preguntas como las siguientes:

   - ¿Ha utilizado el mismo herbicida (ingrediente activo) o productos de una misma familia de afinidad fisiológica (o sea, que comparten el mismo modo de acción en las plantas o igual modo de detoxificación) o de varias de tales familias, durante varios ciclos de cultivo consecutivos, para controlar las malezas? Como se discutió antes, el uso persistente de un mismo herbicida o de herbicidas afines acrecienta la presión de selección sobre las malezas, lo que genera biotipos resistentes.
   - ¿Ha notado una merma paulatina en el grado de control obtenido por aplicar siempre el mismo herbicida?
   - ¿Ha tenido problemas de resistencia al control que hacen los herbicidas en otras malezas o en otras áreas de su finca? ¿Existen malezas resistentes en áreas vecinas?

De las respuestas obtenidas se deduce si vale la pena complementar esta información con preguntas acerca del alquiler de los equipos, de preparación del suelo y de los equipos de cosecha, así como sobre la fuente de la semilla utilizada.

Inspección de campo

Es indispensable verificar en el campo si el grado de control obtenido con el herbicida indica, posiblemente, la presencia de una maleza resistente. El técnico o el productor debe llegar al campo con una mentalidad abierta y con ojo crítico, y actuar del modo siguiente:

- Poner atención a las fallas de control para saber si siguen un *patrón de control* definido: si hay escapes en un patrón riguroso, puede sospecharse que la aplicación no fue de buena calidad. Por ejemplo, la falla podría deberse a la ausencia de traslape adecuado en la aplicación, al atascamiento de una boquilla o a la posición de la barra de aspersión durante la aplicación (muy cerca del suelo puede dejar fácilmente franjas sin tratar).
- Conocer el *espectro de acción* del herbicida. La proliferación de una maleza puede deberse a que ella no es controlada por el herbicida (es una especie tolerante). Este reclamo se presenta a menudo cuando, después de la aplicación del bispiribac-sodio, hay proliferación de *Leptochloa* spp. y de *Digitaria* spp., pues ocurre que ese producto no controla estas especies. Asimismo, la ineficacia de algunos herbicidas, por ejemplo de los tiocarbamatos, puede deberse a la abundancia de poblaciones de microorganismos del suelo ('enriquecimiento' del suelo) que degradan aceleradamente el herbicida.
- Cuando hay *malezas que escapan* al control del herbicida, observar las que están alrededor del 'escape' para saber si las afectó el herbicida. Al comienzo de estos problemas, se encuentran plantas de una especie de maleza severamente afectadas por el herbicida y, junto a ellas, otras de edad y tamaño iguales que no han sufrido ningún daño. Otra manifestación de la resistencia al herbicida es la capacidad de rebrote de las plantas moderadamente afectadas. Es importante, por tanto, que la visita al campo se haga en el *momento oportuno*. Cuando ha habido una presión de selección continua y fuerte (aplicaciones muy repetidas), es posible encontrar un 'monocultivo' de la maleza, lo que indicaría un nivel crítico del problema.

Confirmación experimental de la resistencia

El procedimiento que debe seguirse para detectar una maleza resistente ocupa un capítulo entero de la obra de Valverde et al. (2000). Las pruebas experimentales recomendadas tienen diversos grados de complejidad y refinamiento, que dependen de la pregunta que se desea contestar:

- Si únicamente se desea *verificar* que una población de malezas es resistente, se hace una aplicación del herbicida en un área limitada del campo ensayando tres dosis: la comercial y una o dos más altas (por ejemplo, el doble y el cuádruple); se incluye además la dosis cero: el testigo no tratado. Una vez que los síntomas de la toxicidad se desarrollen, se hace una evaluación visual del daño. Si la experiencia dicta que el herbicida controla bien la maleza en la dosis comercial y en esta prueba no se observan daños severos en las plantas debidos a dosis altas, habría una sospecha fundada de que la población evolucionó hacia la resistencia. Esta prueba tiene dos ventajas prácticas:
  - permitiría hacer una aplicación oportuna de un herbicida alterno;
  - serviría para suspender la aplicación del producto en otros

predios donde se sospeche que algunas malezas pueden ser resistentes a él.

- Si se hace un *análisis más elaborado*, se recolecta semilla de las plantas sospechosas de ser resistentes y de otras que se sabe son susceptibles y que servirán de referencia. La semilla recolectada se hace germinar y se somete a bioanálisis en el invernadero (obteniendo plantas enteras) o en el laboratorio (analizando plántulas, tejidos, orgánulos o sistemas enzimáticos). El diagnóstico agronómico estándar se basa en un *bioanálisis* de plantas enteras que se tratan con dosis crecientes del herbicida, según un diseño experimental apropiado que incluye un número razonable de dosis (cinco o más, incluyendo el testigo no tratado) y varias repeticiones. Las poblaciones susceptibles (la referencia) se comparan con aquellas que han despertado la sospecha de resistencia. Aplicado el herbicida bajo condiciones controladas y una vez manifestados los síntomas de fitotoxicidad en las plantas, se valora la respuesta de la maleza a las dosis crecientes del producto (incrementadas siempre según un multiplicador común).

  Los resultados se miden, generalmente, en peso fresco o en peso seco. Utilizando un modelo de regresión apropiado (Streibig et al., 1993), se procede a calcular la dosis del herbicida que cause una reducción de un 50% de crecimiento de la maleza. A este valor se le denomina 'dosis de reducción de la mitad del crecimiento' (RC_{50}). Para verificar si la población de malezas estudiada es resistente, se calcula la relación entre la RC_{50} de la población sospechosa y la de la población de referencia. El valor obtenido se denomina ***índice de resistencia*** (IR). Si el IR es mayor que 2.0, se confirma que la población analizada es resistente (Figura 3). La regresión puede hacerse empleando distintos paquetes estadísticos; por ejemplo, Ritz y Streibig (2005) desarrollaron un protocolo para este análisis, denominado DRC ('dose response curve', curva de respuesta a las dosis), el cual emplea un programa de cómputo de libre acceso que puede consultarse en Internet.[1]

- Aplicando los mismos principios, se pueden hacer pruebas en *cajas de Petri*: se hacen germinar semillas sobre agar al que se ha incorporado el herbicida (se emplean varias dosis); en vez de semillas se usan tejidos vivos, como trozos de hojas o hijos (macollas) de gramíneas recolectadas en el campo.
- Si se desea comparar los efectos fisiológicos del herbicida en plantas resistentes o susceptibles, se pueden hacer pruebas con extractos crudos, con enzimas purificadas y hasta pruebas específicas de ADN si ya se conoce la mutación responsable de la resistencia.

Cualquiera que sea el método que se utilice para diagnosticar la resistencia de la maleza al herbicida, es importante tener un buen testigo o biotipo de referencia para hacer comparaciones. Ahora bien, ante una falla de control en el campo, y en ausencia de una prueba confirmatoria rápida, lo mejor es suponer que la población de malezas es resistente, suspender la aplicación del herbicida y establecer prácticas de manejo apropiadas.

Prevención y manejo de la resistencia

Cuando se emplea repetidamente una misma técnica de control de las malezas, la variabilidad genética inherente a esas

1. www.r-project.org

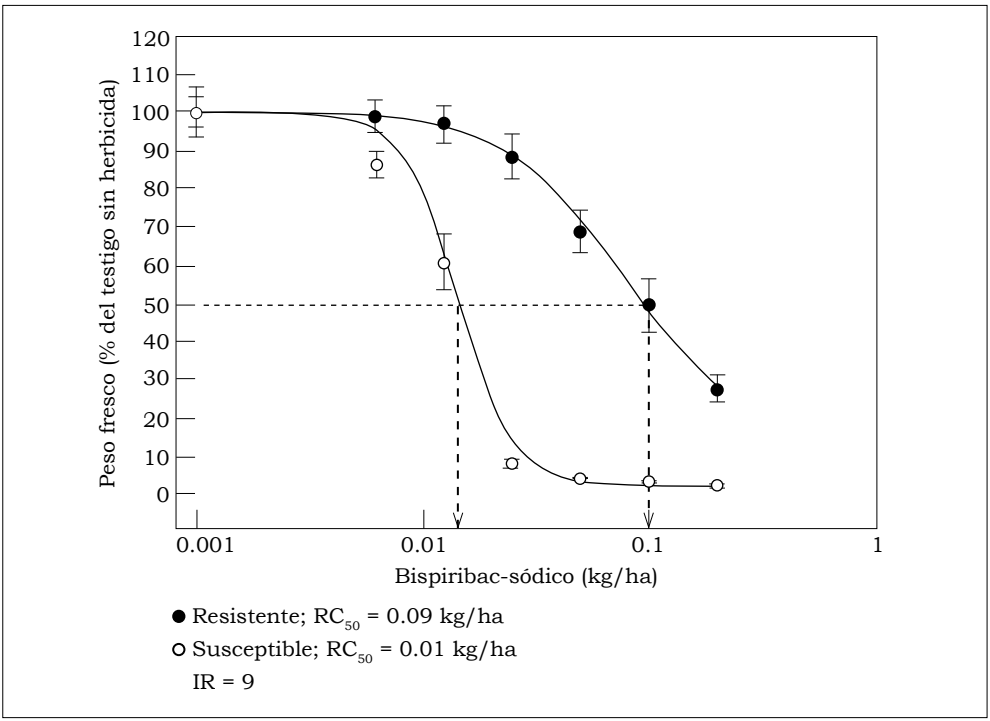


Figura 3. Respuesta de un biotipo resistente y de otro susceptible de *Echinochloa phyllopogon* a dosis de bispiribac-sódico, en California, Estados Unidos. Las líneas punteadas verticales indican los valores de las dosis de reducción del crecimiento de la mitad de la población (RC_{50}), cuyo cociente es el índice de resistencia (IR). (Adaptada de Osuna et al., 2002.)

especies conduce, con el tiempo, a la aparición de genotipos dotados de la capacidad adaptativa necesaria para sobrevivir al control. Ésta es la base de la evolución hacia la resistencia a los herbicidas en las malezas. Para impedir, por tanto, o retrasar esa evolución, hay que reducir la presión de selección ejercida en las malezas por el uso repetido de ciertos herbicidas; en realidad, este uso reiterado es el factor más importante de la evolución hacia la resistencia.

El concepto básico de la prevención es el siguiente: si las plantas que sobreviven a la aplicación repetida de un herbicida serían portadoras de genes de resistencia, estas plantas deben eliminarse mediante *otra técnica* de control de malezas; repetir la aplicación del herbicida es contribuir a la proliferación de los genotipos resistentes. Por consiguiente, es necesario combinar técnicas que controlen esos 'escapes' del control herbicida, protegiendo así la vida útil del herbicida.

- La prevención y el manejo de la resistencia a los herbicidas se basan entonces en la implementación de un **programa integral de manejo de las malezas que combine la prevención, el manejo agronómico y el control químico.**

Las siguientes *prácticas* se consideran importantes en una inspección periódica de los lotes o predios:

- Detectar la presencia de 'escapes' al control herbicida para evaluar cualquier merma en la eficacia de ese control con respecto a años anteriores.
- Establecer métodos eficaces de detección de la resistencia a los herbicidas.
- Detectar 'manchones' incipientes de malezas resistentes, que pueden eliminarse manualmente en forma localizada o empleando otros métodos físicos o distintos controles químicos.
- Emplear todas las formas posibles de manejo para eliminar las plantas que escapan a un herbicida; así se evita que su semilla resistente se incorpore al banco de semillas del suelo.

Prevención

La tarea más importante en un plan de prevención de la resistencia de las malezas a los herbicidas es la siembra de ***semilla certificada*** libre de malezas. Hay que lamentar que, en muchos casos de semilla certificada de arroz, sus niveles de tolerancia permiten una presencia mínima de semillas de ciertas especies de malezas. Ahora bien, si la semilla certificada fuera portadora de semillas de alguna maleza resistente, es necesario implementar medidas que permitan eliminar por completo la tolerancia mencionada. Estudios genéticos hechos en California demuestran que la distribución geográfica de *E. phyllopogon* se debe a su dispersión en la semilla. Aunque se considera factible imponer una norma de cero tolerancia de esta contaminación, aún persiste una tolerancia mínima de semillas de esta maleza en la semilla certificada de arroz.

En general, es necesario implantar las siguientes *prácticas* de prevención:

- Impedir que el agricultor siembre semilla del año anterior porque así se evita que aparezca el arroz maleza (por ejemplo, el arroz rojo).
- Evitar también la contaminación de los equipos agrícolas con semilla de las malezas resistentes a los herbicidas; la limpieza del equipo que pasa de un predio a otro es esencial, y es una operación crítica cuando se contratan cosechadoras.
- Cosechar al final de la etapa de recolección las áreas del arrozal en que se hayan detectado malezas resistentes.

Manejo agronómico

El riesgo de resistencia de las malezas a los herbicidas es particularmente elevado en los sistemas de *monocultivo* del arroz, porque en éste las aplicaciones de herbicidas no se complementan con técnicas alternativas de control de malezas. El objetivo es pues reducir la presión de selección que genera el uso reiterado del herbicida empleando, además de éste, otras *opciones no químicas* de control. Las técnicas agronómicas, por sí solas, proporcionarían un control parcial, pero empleadas como complemento de la acción de los herbicidas pueden suprimir los genotipos de malezas que escapen a la aplicación del agroquímico.

Rotaciones

El monocultivo del arroz perpetúa un ecosistema que favorece a algunas malezas y las convierte en un problema crítico. Los diversos sistemas o modalidades de cultivo del arroz permiten su siembra continua, y a ésta se asocian malezas cuyos géneros se repiten en los ecosistemas aptos para el arroz en todo el mundo. La infestación se vuelve fuerte y pertinaz y obliga al agricultor al uso repetido de cierto grupo de herbicidas, lo que favorece la evolución hacia la resistencia de esas

malezas e incrementa, de paso, la carga ambiental de plaguicidas. Ahora bien, la rotación del cultivo *interrumpe el ciclo* de muchas malezas difíciles y permite emplear diferentes técnicas de control y otros herbicidas. La rotación del arroz es frecuente en los sistemas de secano de Asia y en los de arroz con riego del sureste de Estados Unidos, pero no lo es en América Latina ni en California. Se conocen los casos siguientes:

- La rotación del arroz con soya (o con otros cultivos) ha sido útil para manejar las especies *E. crus-galli* y *E. colona*, que han desarrollado resistencia al propanil en Arkansas (Estados Unidos) y en América Central.
- En Uruguay, el arroz se rota con pasturas perennes y en esos arrozales la presencia de resistencia a los herbicidas es extremadamente baja, por dos razones: no se aplican herbicidas a las pasturas, y ellas reducen la incorporación al suelo de las semillas de las malezas del arroz.

Siembra retrasada y labranza reducida

La *primera técnica* es muy eficaz, se emplea con frecuencia para el manejo del arroz maleza y puede adaptarse a diversas modalidades de cultivo del arroz. Funciona del modo siguiente: una vez preparado el suelo para la siembra, se espera que una lluvia o un riego auxiliar promueva la emergencia de las malezas; éstas se eliminan entonces mediante una labranza muy superficial o aplicando un herbicida no selectivo como el glifosato, el glufosinato o el paraquat (antes de la siembra del arroz). Este control no selectivo eliminará las malezas resistentes y gran parte de las que (sin esta práctica) hubieran emergido luego en el cultivo. Dado que algunas especies de malezas suelen emerger en tandas sucesivas, es a veces necesario repetir la operación.

La *segunda técnica*, que implementa la práctica ideal, consistse en la siembra del arroz sin remover el suelo o haciendo una remoción mínima de suelo, por ejemplo con cero laboreo o con labranza mínima, a fin de no promover la emergencia de nuevas malezas. El retraso en el tiempo normal de siembra que implica esta práctica puede requerir, en climas templados, el empleo de variedades de arroz de ciclo corto y, en las regiones tropicales, una solución al exceso de humedad del terreno (por el retraso de la siembra) que no permitiría el ingreso de implementos agrícolas.

Sistemas de establecimiento

En California, donde el arroz rara vez se rota con otros cultivos y el control de los biotipos resistentes de *Echinochloa* spp. se ha vuelto, por ello, extremadamente difícil, se están probando sistemas alternos de establecimiento del cultivo para enfrentar ese problema. El objetivo principal es combinar las siguientes opciones:

- Alternar un establecimiento del cultivo de condiciones aeróbicas con otro de condiciones anaeróbicas.
- Emplear la técnica de la siembra retardada.
- No remover el suelo para que no salgan a la superficie, desde el banco de semillas del suelo, nuevas semillas portadoras de resistencia.
- Introducir herbicidas que no hayan generado resistencia o que no puedan usarse (por reglamentación oficial) en la práctica corriente (p. ej., en la siembra en agua).

La tradicional ***siembra en agua*** (siembra de semilla pregerminada en un terreno inundado) está asociada con un espectro bien definido de malezas; este espectro cambia drásticamente cuando el arroz se siembra en suelo seco (Figura 4). Por tanto, si una especie de maleza de difícil manejo adquiere resistencia a un

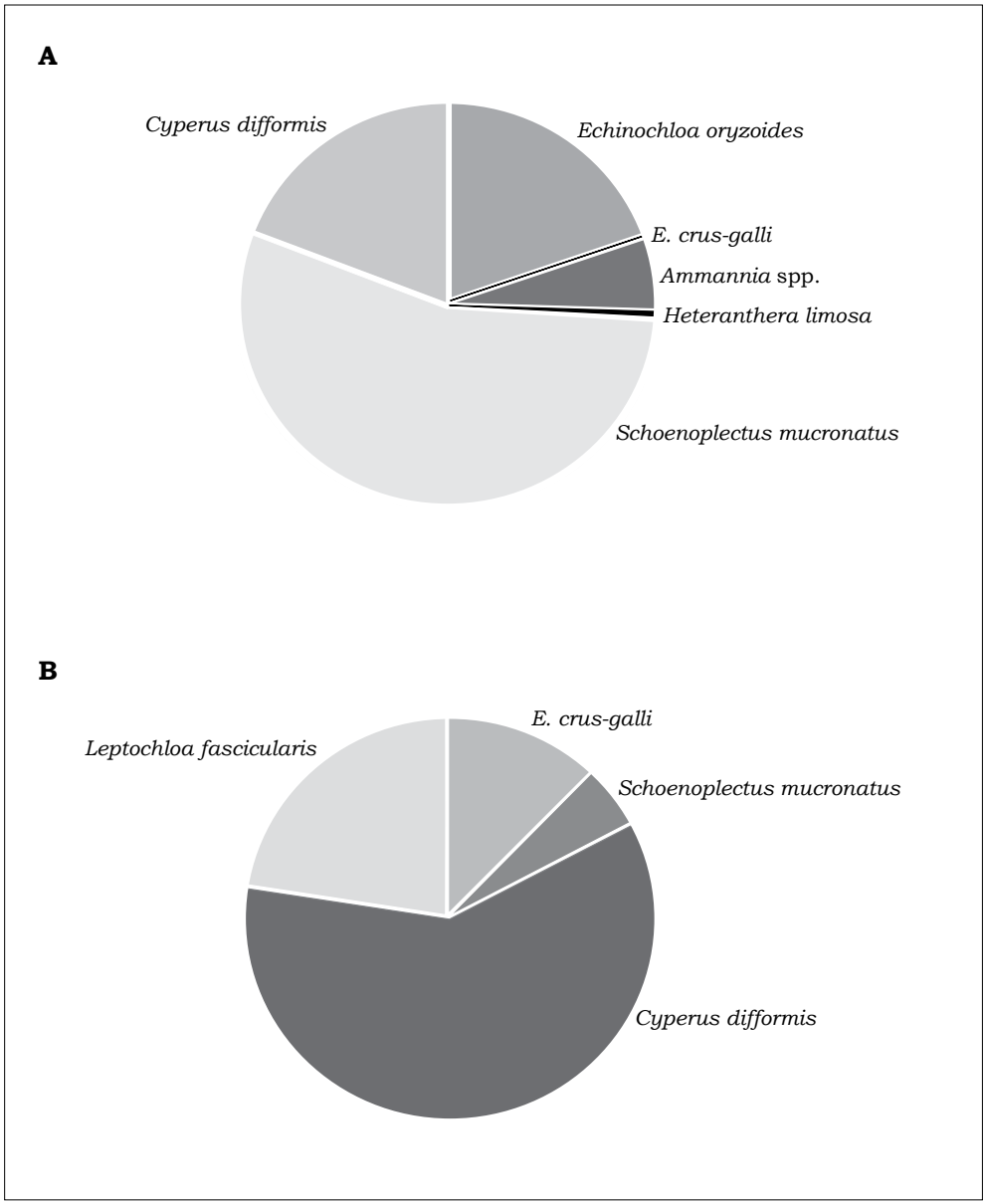


Figura 4. Especies de malezas observadas durante el establecimiento de cultivos de arroz sembrados de dos maneras diferentes: (A) desde un aeroplano sobre suelo inundado (en ambiente aeróbico); (B) con sembradora en suelo seco (en ambiente anaeróbico).

FUENTE: A. Fischer, M. Moechnig y K. Pellerin, 2003, ensayos no publicados de la Estación Experimental de Arroz en Biggs, California, Estados Unidos.

herbicida en un sistema de siembra anaeróbico, el problema que causa puede disminuir si se cambia a un sistema de siembra en seco (aeróbico) y viceversa.

La ***siembra retardada*** junto con la aplicación de glifosato ha sido exitosa, tanto en sistemas convencionales de siembra en agua como en sistemas de siembra en suelo seco, y ha reducido la incidencia de las malezas en un 75%. Si este tipo de siembra se combina con labranza cero, se obtiene un 90% de reducción de las malezas tradicionalmente presentes. Además, puesto que la siembra retardada reduce la infestación de malezas en cultivos posteriores de arroz, permitiría reducir en ellos el empleo de los herbicidas y obtener los beneficios que trae consigo esta reducción.

Si la siembra en agua sin laboreo se *combina* con un tratamiento de presiembra con glifosato y con una lámina de agua permanente de 10 a 15 cm, que se mantendrá más adelante, es posible llevar el cultivo a cosecha sin hacer otra aplicación de herbicida. Asimismo, la alternancia de la siembra anaeróbica con una siembra en suelo seco hizo posible la aplicación del herbicida pendimetalina, que no está registrado en California para ser usado en el arroz sembrado en agua, aunque controla los biotipos de *Echinochloa* spp. resistentes a otros herbicidas. Asimismo, la siembra retardada permite el uso del glifosato para controlar todas las especies de malezas resistentes a los herbicidas.

En resumen, aunque la rotación del arroz con otros cultivos presentaba inconvenientes en California, se demostró que era posible obtener muchos de los beneficios de esa práctica con la rotación de diferentes técnicas de establecimiento del cultivo, combinando además en ellas las cuatro opciones antes mencionadas. Esta experiencia es un ejemplo de integración de tácticas de manejo aplicadas a las malezas resistentes a los herbicidas en el cultivo del arroz.

Control de la producción de semilla

Un objetivo fundamental del manejo de la resistencia de las malezas a los herbicidas es el siguiente: evitar *por todos los medios* que las plantas que escapan al herbicida produzcan semilla. El agricultor no debe escatimar esfuerzos en la tarea de detectar los 'escapes'. Las prácticas agronómicas deben complementar la acción de los herbicidas para minimizar las oportunidades de que las plantas sobrevivientes de las malezas se reproduzcan. Las tres prácticas siguientes son primordiales:

- Establecer una lámina de inundación permanente (en el arroz con riego).
- Establecer un cultivo denso y competitivo.
- Sembrar variedades de arroz competitivas (ver más adelante).

Al momento de la cosecha del arroz se encuentran malezas en estado vegetativo, que producirán semilla más tarde si las condiciones de humedad y temperatura lo permiten. Hay dos prácticas que pueden eliminar esas plantas:

- ***Enterrar o quemar*** los rastrojos después de que haya *madurado su semilla* (si es posible o permitido hacerlo), práctica útil para retardar la evolución hacia la resistencia de esas malezas.
- Puesto que muchas malezas *han desgranado ya* al llegar la cosecha del arroz, ***quemar*** el rastrojo para obtener dos cosas: reducir la viabilidad de las semillas que yacen sobre la superficie del suelo, y romper incluso su latencia (para eliminar más tarde las plántulas que emerjan).

En la práctica, los resultados no siempre han sido muy exitosos porque en muchas partes hay restricciones a la quema de rastrojos por razones ambientales. En California se observó que, al enterrar el rastrojo posterior a la cosecha, se incorporaban al suelo semillas de malezas y, por ello, la infestación de los campos con *Echinochloa* spp. en la primavera siguiente era muy alta. En cambio, cuando los rastrojos no se entierran y los campos permanecen cubiertos de agua durante el invierno, hay un descenso significativo de semillas de *Echinochloa* spp. porque las aves y las ratas las consumen, lo que reduce mucho el nivel de infestación de la maleza al año siguiente.

La semilla es un propágulo que disemina la resistencia a los herbicidas en extensas áreas. Por ejemplo, en California, *E. phyllopogon* es una maleza resistente a los herbicidas, y sus biotipos se han dispersado mucho en los arrozales de ese Estado; estos biotipos tienen un estrecho parentesco genético y son, probablemente, descendientes de un mismo genotipo que se dispersó a partir de una fuente original (Tsuji et al., 2003). Casos como éste han convertido el control de la dispersión de la semilla de esta especie resistente a los herbicidas en un objetivo prioritario.

Habilidad competitiva del cultivo

Los estudios hechos en el Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT) con cultivares de arroz con riego y de secano, así como los trabajos realizados en California (Fischer et al., 1997; 2001; Gibson y Fischer, 2004) han demostrado la posibilidad de obtener cultivares de arroz muy productivos y de gran capacidad para suprimir el crecimiento y la fecundidad de *Echinochloa* spp. y otras malezas; estos atributos del arroz permiten reducir el número de aplicaciones de herbicida en esos cultivos. La habilidad competitiva del arroz está ligada a características de la planta relacionadas con la captura de luz, la duración del ciclo de vida del cultivo y la habilidad de las plantas para aprovechar los nutrientes. Las prácticas de cultivo que el productor realiza normalmente permiten responder a esas características y no le representan un costo adicional.

En el cultivo del arroz, especialmente si se cultiva en el sistema con riego, hay un *período crítico* durante el cual el arroz debe estar libre de malezas para que no sufra pérdidas de rendimiento. Finalizado ese período crítico, el arroz puede impedir el establecimiento de nuevas cohortes de malezas (Gibson et al., 2002; Fischer et al., 1993). Llegar a esta condición es fundamental para evitar la producción tardía de semillas de malezas y para reducir el número de aplicaciones de herbicidas. Importa mucho entonces conocer este período crítico para poder proporcionar a las plantas las condiciones de crecimiento que permitan acortarlo. Por otra parte, una buena nivelación del terreno favorece el establecimiento de una lámina de inundación permanente, la cual se sumará a la capacidad del arroz para impedir el establecimiento de las malezas.

Otras opciones

En un clima templado, la temperatura del agua es baja y permite mantener niveles significativos de oxígeno disuelto. Esta condición hace posible la siembra de arroz con *semilla pregerminada* en un terreno inundado. Asimismo, si la lámina tiene de 10 a 15 cm de profundidad, impide la emergencia de malezas importantes como *Leptochloa* spp. y *E. crus-galli;* esta última ha evolucionado hacia la resistencia a diversos herbicidas en muchos ecosistemas arroceros. Este tipo de siembra se practica en Australia, Chile, California y en la zona arrocera del

Mediterráneo. En la zona intertropical, la temperatura del agua es más elevada y el crecimiento microbiano agota considerablemente el oxígeno disuelto en ella; no obstante, los estudios hechos en el CIAT identificaron genotipos cuya semilla pregerminada toleraba de modo significativo la sumersión en condiciones tropicales.

Por otra parte, en investigaciones llevadas a cabo en el Instituto Internacional de Investigaciones sobre el Arroz (IRRI), en colaboración con investigadores del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA) en Arkansas, se identificaron *cultivares alelopáticos* de arroz de gran capacidad para suprimir el crecimiento de *E. crus-galli* y otras especies de malezas. Este resultado ofrece amplias oportunidades de integrar el mejoramiento del germoplasma en el manejo integral de las malezas resistentes a los herbicidas (Olofsdotter et al., 2002).

Uso de herbicidas

Lo más importante aquí es evitar el uso repetido de un herbicida con el fin de reducir la presión de selección que haría el herbicida en las malezas. La solución es *combinar productos* para que uno de ellos elimine las plantas que escapen al otro, y así retrasar la evolución hacia la resistencia que generarían ambos por separado. Asimismo, el empleo de herbicidas alternativos será otra forma de controlar la producción de semilla de las malezas que escapen al herbicida alterno o que emerjan tardíamente (si se alternan en un mismo ciclo). Por último, los herbicidas no selectivos se emplearían cuando las malezas sobrevivientes aparezcan en manchones relativamente discretos.

Alternancia y mezcla de herbicidas

¿Tiene validez la práctica de alternar el uso de herbicidas cuyo modo de acción es diferente o de aplicarlos en mezcla?

- La recomendación de rigor es *rotar herbicidas* cuyo modo de acción sea diferente (o hacer mezclas con ellos), no sólo en las aplicaciones sucesivas que se hacen en un ciclo de cultivo, sino entre un cultivo y el de la temporada siguiente. Ahora bien, la aparición de biotipos de malezas cuya capacidad metabólica de desintoxicación es tan grande que les permite degradar diversos herbicidas de modo de acción diferente, indica claramente que la sola alternación de modos de acción no es suficiente para manejar la resistencia de las malezas a los herbicidas. Por tanto, se deberían alternar herbicidas cuya ruta bioquímica de degradación sea diferente. Esta práctica tiene algunas complicaciones:

  - la información pertinente no es de fácil acceso o está incompleta;
  - las malezas se desintoxican de muchos herbicidas a través de mecanismos metabólicos similares.

  Anteriormente se mencionó que, en California, las especies de *Echinochloa* eran capaces de oxidar un buen número de herbicidas por medio de las monoxidasas P450. Hay también herbicidas cuya estructura química es, al parecer, muy diferente una de otra en el papel y que, no obstante, son objeto de desintoxicación en la planta mediante reacciones bioquímicas similares.

  En todo caso, la rotación de herbicidas sigue siendo un componente válido del manejo integral de la resistencia a los herbicidas, por varias razones:

- primera, porque es una técnica efectiva para retrasar la evolución hacia la resistencia que ofrece la maleza en el sitio de acción del herbicida;
- segunda, porque si bien las rutas de desintoxicación del herbicida en las malezas pueden pasar por mecanismos metabólicos similares —como es el caso de la monoxidación por enzimas P450 o de la conjugación con glutatión mediada por glutatión-*S*-transferasas (GST)— cada uno de estos mecanismos puede involucrar muchísimas isoenzimas que tienen diversos grados de especificidad por los sustratos en que actúan y que obedecen a un control genético diferente. Es decir, dos herbicidas pueden degradarse en la maleza por monoxidación, pero las isoenzimas P450 involucradas pueden ser diferentes para cada herbicida y específicas de él.

- Los herbicidas pueden *alternarse* o emplearse como *mezclas* de aplicación simultánea. La aplicación en secuencia es interesante porque controla los 'escapes' del herbicida anterior, controla las malezas de emergencia tardía, e impide la incorporación de las semillas de estas últimas, antes de la cosecha, al banco o reservorio de semillas del suelo. Ahora bien, hay que tener en cuenta que el segundo herbicida de la secuencia ejercerá presión de selección por resistencia en las malezas de emergencia tardía.

  Esta presión no se presenta si se emplea una mezcla de herbicidas en que la acción de los componentes (generalmente dos) sea simultánea. Sin embargo, si una población de malezas ya es resistente a uno de los componentes, la mezcla no protegerá de esa resistencia al segundo componente. Una condición importante: ambos herbicidas de la mezcla deben ser efectivos en la misma especie de maleza y su persistencia o efecto residual debe ser similar; de este modo se logra, en la jerga de los aplicadores, que "un herbicida proteja al otro". La diferente persistencia de los componentes no representa un problema si la mezcla se aplica una vez que todas las malezas hayan emergido. Por ello, la práctica ideal es aplicar primero una mezcla y luego, si es necesario, controlar los escapes o las nuevas malezas con una mezcla diferente.

¿Es posible que la aplicación de tantos herbicidas pueda conducir a la acumulación de varios mecanismos de resistencia en un mismo individuo (resistencia múltiple)?
La posibilidad existe, pero si cada mecanismo implica una mutación diferente, la coincidencia de todas las mutaciones en un individuo tiene una probabilidad de ocurrencia muy baja.

¿Es posible también que el uso de varios herbicidas pueda acelerar la selección de biotipos de maleza por resistencia metabólica a los herbicidas?
También es posible, si los mecanismos de degradación de los herbicidas y las isoenzimas responsables de ellos en las plantas son comunes para los herbicidas involucrados. Esta posibilidad es muy real si se considera que el único inhibidor de P450 (el malatión) fue capaz de bloquear la resistencia metabólica a herbicidas tan diferentes como penoxsulam, bispiribac-sódico, tiobencarbo y cihalofop-butilo en los biotipos resistentes de *E. phyllopogon* hallados en los arrozales de California; este hecho sugiere que, en este caso al menos, existe el mecanismo común antes mencionado.

En conclusión, hay datos suficientes para reconocer que el manejo de la resistencia a los herbicidas no se logrará únicamente con el control químico, sino que requiere de un programa de *manejo integral* que incorpore métodos de control opcionales.

Agentes sinérgicos

Una estrategia muy útil en el manejo de la resistencia de las malezas a los herbicidas es el uso de mezclas sinérgicas. ¿Qué hace un agente sinérgico? Es posible que no tenga efecto alguno sobre la maleza, pero es capaz de *acrecentar o de restablecer* la acción del herbicida, para que éste pueda controlar un biotipo resistente de maleza, aun con dosis menores que la recomendada. Esta *dosis reducida*, además de controlar la maleza resistente, limita la presión de selección que ejercería una dosis alta del herbicida en la población de malezas. Los agentes sinérgicos a menudo inhiben selectivamente (sin afectar el arroz) el mecanismo que utiliza la maleza para desintoxicarse del herbicida (resistencia metabólica).

Con frecuencia, el mecanismo metabólico que hace a un herbicida selectivo para el arroz coincide con el que le confiere resistencia a la maleza. Por consiguiente, el agente sinérgico debe inhibir la isoenzima responsable de la desintoxicación en la maleza, pero no debe tener afinidad por la isoenzima que hace funcionar el mismo mecanismo en el arroz. Esta situación puede parecer fortuita, y en buena medida lo es, pero el cultivo del arroz presenta, por fortuna, dos ejemplos exitosos:

- **Organofosforados.** Valverde et al. (2000) desarrollaron la mezcla de piperofos y luego de anilofos, dos herbicidas organofosforados, con propanil para vencer la resistencia de *E. colona* a este herbicida. Como se explicó antes, la resistencia de la maleza al propanil es de origen metabólico y consiste en un incremento de la actividad de la enzima AAA-asa. Esta misma enzima desintoxica el arroz del propanil que recibe, lo que permite el uso selectivo de este herbicida. Hay algunas diferencias entre la AAA-asa del arroz y la de *E. colona*, entre otras que la primera tiene mayor afinidad por el propanil que la de los biotipos resistentes y susceptibles de la maleza. La mezcla, por tanto, funciona del modo siguiente: el agente sinérgico actúa como un inhibidor competitivo de la enzima, y sería más eficaz en *E. colona* que en el arroz; por su parte, los herbicidas piperofos y anilofos son selectivos del arroz porque éste posee la capacidad de metabolizarlos. Esta misma mezcla funciona para *E. crus-galli,* que es resistente al propanil, aunque los resultados son un poco más erráticos, quizás porque las isoenzimas involucradas son distintas en ambas especies.
- **Tiobencarbo.** De manera similar, Fischer et al. (2004a) desarrollaron en California la mezcla de tiobencarbo con bispiribac-sódico para vencer la resistencia de *E. phyllopogon* a este último. En la dosis empleada y en la época en que se aplica la mezcla, el tiobencarbo no tiene efecto alguno en el crecimiento de la maleza, pero elimina la resistencia de ésta al bispiribac. Esta resistencia es también de tipo metabólico y se relaciona con la monoxidasa del tipo citocromo P450. El tiobencarbo sería un inhibidor de la P450 y resulta interesante que *E. phyllopogon* es resistente al tiobencarbo, también a causa de la P450. En consecuencia, el tiobencarbo estaría actuando como 'sustrato trampa' para esta enzima (la monoxidasa del citocromo) impidiendo

así que actúe sobre el bispiribac. De todos modos, el tiobencarbo es más específico de las isoenzimas presentes en la maleza que de las que existen en el arroz, ya que el control se sinergiza sólo en *E. phyllopogon* sin incrementar la fitotoxicidad que se hubiera causado al arroz. El tiobencarbo, en efecto, es metabolizado por el arroz.

En ambos casos de sinergismo, tanto el propanil como el bispiribac-sódico se emplean en la mezcla con el agente sinérgico en dosis mucho menores que las recomendadas para los cultivos de campo.

El uso de herbicidas para manejar la resistencia de las malezas a otros herbicidas requiere de planificación cuidadosa. Es importante llevar un registro de los herbicidas que se utilizaron en cada lote de la finca arrocera. Asimismo, hay que planear cuidadosamente el uso de los herbicidas para los años futuros en función de los que se aplicaron en el pasado, de los resultados obtenidos en las inspecciones y de las pruebas de detección de resistencia.

Variedades de arroz resistentes a herbicidas no selectivos

Se han desarrollado dos tipos de arroz resistentes a los herbicidas:

- Una variedad de ***arroz transgénico*** que tiene resistencia al glufosinato y al glifosato. Estos dos herbicidas no son residuales y tienen un bajo riesgo de evolución de resistencia; han dado, por ello, excelentes resultados en el control de todas las malezas del arroz resistentes a los herbicidas en California. Prácticamente, no son degradados por las plantas; en consecuencia, la posibilidad de quedar sujetos a la resistencia metabólica observada en las malezas del arroz es también remota. Su carácter no selectivo simplifica las operaciones del agricultor y, siendo herbicidas de acción foliar, se adaptan a las prácticas de siembra retardada y de labranza cero. La variedad de arroz resistente al glufosinato se introduce actualmente en diversos lugares, en especial para controlar el arroz maleza. Ahora bien, esta estrategia puede presentar algunos problemas:

  – Si se vuelve muy atractiva, puede conducir a un *uso repetido* del mismo herbicida, que trae consigo el riesgo de que la maleza evolucione hacia la resistencia o de que ocurran cambios drásticos en la población de malezas; por ejemplo, sustitución de las especies actuales por otras naturalmente tolerantes de esos herbicidas.
  – Hay siempre un riesgo de que un *flujo de genes* desde los materiales transgénicos hacia individuos del arroz maleza escapen al herbicida; por ejemplo, plantas de arroz voluntario (transgénico o no comercial) en un cultivo subsiguiente podrían hibridarse con el arroz maleza o con el arroz comercial.

El flujo de genes hacia el arroz comercial es un problema en California, donde la ley de preservación de germoplasma impuesta en ese Estado prohíbe la contaminación del arroz común con el arroz transgénico para evitar problemas de comercialización en el mercado extranjero. Los estudios hechos en California con cultivos de arroz transgénico resistente a los dos herbicidas mencionados demuestran que su polen no es capaz de fecundar el arroz comercial a una distancia mayor que

1.8 m de la fuente de polen (Fischer et al., 2004b); podrían fijarse, por tanto, distancias de aislamiento que eviten la contaminación entre los cultivos vecinos. Sin embargo, en regiones más húmedas el polen tiene una viabilidad más prolongada y puede transferirse al arroz maleza desde mayores distancias (Gealy et al., 2003). Es posible diseñar una estrategia para reducir el flujo de genes, que incluya distancias de aislamiento, restricciones a la resiembra en la misma área y prohibición del uso repetido de esta tecnología en un mismo lugar. Sin embargo, en áreas arroceras infestadas con arroz maleza será difícil evitar por completo el flujo de genes de resistencia (del arroz comercial) hacia esa maleza. Respecto al manejo de la resistencia a los herbicidas, la integración de esta tecnología (arroz resistente transgénico) con otras técnicas y con otros herbicidas será, sin duda, una herramienta de enorme valor.

- Otro tipo de arroz resistente a los herbicidas está representado en los ***cultivares de arroz IMI*** o Clearfield®, que resisten los herbicidas del grupo de las imidazolinonas (de ahí la abreviatura IMI). Estas variedades fueron obtenidas mediante mutación inducida y el gen de resistencia fue luego transferido al arroz comercial en un cruzamiento convencional. Dado que no es un arroz transgénico, el arroz Clearfield no está sujeto, en muchos países, a rigurosos análisis de riesgo antes de que su uso sea aprobado ni a las restricciones comerciales internacionales que afectan a los cultivos transgénicos. El arroz IMI fue desarrollado para controlar el arroz maleza, y se siembra comercialmente en el sureste de Estados Unidos y en varios países latinoamericanos. Los mismos problemas mencionados antes se aplican para este tipo de arroz, por lo que es importante imponer medidas que mitiguen el flujo de sus genes hacia el arroz maleza (Olofsdotter et al., 2000).

  El arroz IMI tiene un *riesgo adicional*: posee resistencia a inhibidores de la ALS, que son los herbicidas con mayor probabilidad de iniciar una evolución hacia la resistencia en las malezas. De otro lado, un control eficaz del arroz maleza recomienda dos aplicaciones de estos herbicidas en cada ciclo de cultivo, lo que resulta en una fuerte presión de selección; ocasionalmente se aprueba hasta una tercera aplicación (llamada de rescate) cuando la densidad de la población de plantas que escapan al herbicida es alta. En Costa Rica se han identificado híbridos entre arroz maleza y arroz Clearfield (se asume que lo son) en campos comerciales después de sólo dos siembras consecutivas de arroz cultivado resistente; estos híbridos son resistentes al imazapir que, junto con el imazapic, constituyen la mezcla formulada de las imidazolinonas que se aplica al cultivo (Valverde, datos no publicados).

El riesgo de que las malezas del cultivo de arroz y el arroz maleza (p.ej., arroz rojo) evolucionen hacia la *resistencia a los inhibidores de la ALS* a causa de la presión de selección adicional impuesta por las imidazolinonas (aparte del flujo genético) es, indudablemente, muy grande. Conviene, por tanto, considerar los casos siguientes:

- En el sureste de Estados Unidos, el arroz se rota con soya, cultivo en que también se emplean herbicidas inhibidores de la ALS.
- En California, las especies de *Echinochloa* resistentes a algunos herbicidas ya son también resistentes al imazetapir y a otros herbicidas inhibidores de la ALS (que hubieran

podido usarse con el arroz IMI); el mecanismo es la resistencia metabólica relacionada con las monoxidasas del citocromo P450.
- En conclusión, la utilidad del arroz IMI para manejar la evolución hacia la resistencia a los herbicidas en las malezas del arroz es ciertamente dudosa.

Predicción de la evolución hacia la resistencia

Los modelos para predecir la evolución de las malezas hacia la resistencia han avanzado considerablemente desde los primeros que propusieron Gressel y Segel (1990). Estos modelos permiten establecer la importancia relativa de los diversos factores que determinan la evolución hacia la resistencia; son, además, una herramienta útil para orientar la investigación y explorar opciones de manejo que prevengan o retrasen esta evolución.

- El modelo inicial de Gressel y Segel se resume en la siguiente expresión simplificada:

$$N_n = N_0 [1+ f\alpha/\tilde{n}]^n \qquad [1]$$

donde,

N_n es la relación proporcional de individuos resistentes de una población al cabo de n años de uso continuo del herbicida

N_0 es la relación proporcional inicial de individuos resistentes que existían antes de que se usara el herbicida

n es el número de años en que el cultivo ha sido tratado con el herbicida

f es el factor de adaptabilidad ecológica ('fitness') del biotipo resistente relativa a la del biotipo susceptible de la maleza; es alrededor de 0.5 en muchos biotipos con resistencia en el sitio en que actúan las triazinas y no se ha demostrado que sea mucho menor que 1 respecto a otros herbicidas

$\tilde{n}$ es la vida promedio del banco de semillas del suelo para esa maleza; se calcula que es de 2 a 5 años para la mayoría de las malezas anuales

α es la presión (o coeficiente) de selección del herbicida, expresada como el cociente entre la cantidad de individuos resistentes y la de individuos susceptibles al final del ciclo de cultivo, después de que el herbicida ha hecho efecto. Si un herbicida elimina el 99% de los individuos susceptibles y no afecta a ninguno de los resistentes, el valor de α será 1/0.01 = 100; ahora bien, una medida más realista de la presión de selección se expresaría según la diferencia en la producción de semilla resistente y susceptible.

Esta expresión muestra la forma en que la cantidad proporcional (porcentaje) de individuos resistentes aumenta exponencialmente cuando un herbicida se usa repetidamente. Si se hacen variar los parámetros de la ecuación dentro de magnitudes realistas, se ve que la tasa de evolución hacia la resistencia es particularmente sensible a los cambios en la presión de selección y, en segundo lugar, a la longevidad del banco de semillas del suelo (Figura 2,C y 2,D).

- Gressel y Segel (1990) presentaron más tarde un modelo que permite hacer también inferencias sobre la rotación de cultivos y sobre la mezcla de herbicidas. Este nuevo modelo demuestra dos puntos:
  - primero, que las diferencias de ajuste ecológico ('fitness') a favor del biotipo susceptible reducen (en la población de plantas) la relación proporcional (porcentaje) de individuos resistentes, mientras no se aplique el herbicida;

  - segundo, que la evolución hacia la resistencia se retrasa según la duración de los períodos en que no se usa el herbicida y según la frecuencia de estos períodos.

- Maxwell et al. (1990) presentaron un enfoque mucho más completo, basado en un criterio demográfico, para modelar la dinámica de la población de una especie de maleza de ciclo anual. Agregaron luego un submodelo que describe la herencia de la resistencia a los herbicidas según la ley de Hardy-Weinberg, para un par de alelos mayores y con fecundación cruzada al azar; el modelo podría modificarse para considerar los casos de autofecundación. Otro aporte de este modelo es la inclusión de los procesos de inmigración de polen y de semillas (flujo de genes), y del efecto de la competencia entre biotipos que refleja las diferencias de ajuste ('fitness') entre ellos.

Esos modelos sugieren que la evolución hacia la resistencia se retrasa cuando se reduce la presión de selección, una afirmación que ha sido plenamente comprobada. El uso de dosis bajas de herbicida, suficientes para controlar poblaciones de malezas por encima del umbral económico, tendría ese efecto; además, la competencia entre los sobrevivientes disminuiría proporcionalmente el número de individuos resistentes que tengan un ajuste ecológico ('fitness') menor. El modelo de Maxwell et al. (1990) demuestra, además, que si se permite la inmigración de semilla de individuos susceptibles o se dejan franjas del cultivo sin tratar con el herbicida, la semilla producida por las plantas susceptibles diluiría la presencia de las resistentes y retrasaría el avance de la resistencia al herbicida, en especial, en las primeras etapas de la evolución hacia la resistencia. Además, la inmigración de polen susceptible ayudaría a retrasar más dicha evolución.

Aunque este razonamiento era verosímil, se comprendió pronto que había problemas graves de índole práctica, por la siguiente razón: si se permite la supervivencia de algunas plantas de malezas aplicando un control limitado, se dispara el nivel de infestación y la solución resulta claramente antieconómica. Morrison y Friesen (1996) demostraron claramente este resultado empleando un modelo para el control de *Avena fatua*, maleza que posee resistencia a los inhibidores de la ACC-asa en el sitio de acción de estos herbicidas. Además, si el número de individuos de la maleza es mayor, se incrementa la posibilidad de hallar los mutantes resistentes, que son raros. Se sabe también que los alelos resistentes son dominantes o semidominantes; por tanto, la inmigración de polen portador de alelos susceptibles recesivos no hará menguar la evolución hacia la resistencia de las poblaciones de malezas en que hay fecundación cruzada (Jasieniuk et al., 1996, Diggle y Neve, 2001).

- Los modelos anteriores han sido refinados. Gardner et al. (1998) presentaron un modelo que permite simular la evolución hacia la resistencia que es controlada tanto por genes mayores como por la herencia cuantitativa. Ofrece una solución al dilema de que las dosis altas favorecen la resistencia monogénica y las dosis bajas favorecen la resistencia poligénica (ver antes). Este nuevo modelo propone ciclos en que haya secuencias de dosis bajas seguidas por ciclos de dosis moderadas; estas últimas tendrían un nivel de

herbicida suficiente como para eliminar individuos que ya hubieran acumulado algunos genes menores de resistencia.
- Una última contribución ha sido la introducción de la dinámica espacial de plantas en los modelos de resistencia a los herbicidas. La idea surgió al comprobar que las malezas no se distribuyen uniformemente en el campo sino que aparecen en parches. El tamaño de estos parches regula la proximidad entre las plantas y afecta, de este modo, la dinámica de poblaciones, el flujo de genes entre ellas y la dispersión de la resistencia.

Según Diggle y Neve (2001), los modelos de evolución hacia la resistencia se basan en dos componentes fundamentales:

- El primer componente es de *dinámica de poblaciones* y describe, integrando los factores que determinan la supervivencia y la fecundidad, las transiciones que ocurren en el ciclo de vida de una especie de maleza. En cada etapa del ciclo de vida, la fracción de la población que pasa de un estadio a otro está regulada por factores que dependen de la densidad de plantas y de las condiciones externas (lo que permite simular tácticas de manejo).
- El segundo componente se refiere a la *genética de poblaciones* y describe las frecuencias génicas. Este componente incorpora algoritmos para describir los efectos de las diversas situaciones que se discutieron antes (ver ***Por factores relativos a la biología... Fundamento genético***). Incluir aspectos genéticos en un modelo es un refinamiento que le da a éste versatilidad para tratar de simular la evolución hacia la resistencia múltiple, como ocurre con *Lolium rigidum* en Australia.

Los modelos pueden incluir también los efectos que provienen de la distribución espacial de las plantas. Este enfoque permite predecir no sólo la evolución hacia la resistencia en términos de la frecuencia de individuos resistentes a los herbicidas, sino también los cambios que acompañan a los niveles de infestación de tales individuos.

Los modelos tienen dos desventajas:

- Se basan en parámetros para los cuales no hay aún suficiente información; por ejemplo, han sido poquísimos los intentos de determinar con exactitud las frecuencias de mutación o las frecuencias iniciales de los individuos resistentes de una población.
- Sus predicciones rara vez han sido validadas en el terreno.

Cualquiera que sea el nivel de complejidad de los modelos, todos concluyen que el manejo de la resistencia a los herbicidas comprende tres acciones:

- La reducción de la presión de selección.
- La rotación o mezcla de herbicidas en la aplicación.
- La integración de técnicas no químicas de control.

El objetivo final es mantener un nivel bajo de infestación.

Los modelos permiten integrar un número grande de factores complejos para evaluar el éxito relativo de diferentes técnicas de manejo y hacer además un análisis de sus ventajas económicas. Son, además, una excelente herramienta para detectar áreas que deben ser investigadas a fin de conocer mejor los factores involucrados en la evolución de la resistencia a los herbicidas que demuestran las malezas.

Conclusiones

El monocultivo, la dependencia del control químico y la aplicación repetida de herbicidas de igual modo de acción o igual ruta metabólica de desintoxicación en la planta han hecho evolucionar las poblaciones de malezas del arroz hacia la resistencia a los herbicidas. Este *uso repetido* ejerce una ***presión de selección*** a favor de biotipos con capacidad genética para resistir las aplicaciones de herbicidas que normalmente eliminarían las plantas de su especie. Ahora bien, esta presión se reduce mediante una ***acción integral*** que incorpore medidas de control que reduzcan el nivel de infestación de malezas del campo. Por ejemplo:

- Sembrar semilla certificada libre de malezas.
- Hacer inspecciones de campo y pruebas de detección: ambas son fundamentales para prevenir la aparición de las malezas y para iniciar temprano su manejo.
- Hacer secuencias o mezclas de tanque, en que se combinen herbicidas de modo de acción y de mecanismo de degradación diferentes, porque así se retrasa la evolución de las malezas hacia la resistencia.
- Combinar el uso de herbicidas con técnicas agronómicas.

La resistencia de tipo metabólico y la evolución hacia la resistencia múltiple de ciertas malezas son, ciertamente, un desafío que requerirá estrategias creativas y la necesidad de practicar un *control integral* de malezas. Se recomiendan, por tanto, las medidas siguientes:

- El manejo de la resistencia a los herbicidas implica mantener un registro de las *técnicas de control* que se han empleado en un área o predio arrocero; esta información será la base de una planificación a largo plazo cuyos resultados se verán en el futuro.
- Emplear *modelos de predicción* como apoyo de la investigación y como base del diseño y la selección de programas de manejo integral que sean rentables, y conserven los herbicidas como herramienta esencial del manejo de las malezas.

La experiencia demuestra que la adopción de medidas de prevención y de manejo de la resistencia a los herbicidas por el productor arrocero es un proceso difícil. Hay que hacer, por tanto, el esfuerzo de desarrollar y ejecutar ***programas educativos***.

Referencias bibliográficas

Diggle, A.J.; Neve, P. 2001. The population dynamics and genetics of herbicide resistance: A modeling approach. In: Powles, S.B.; Shaner, D.L. (eds.). Herbicide resistance and world grains, CRC, Boca Ratón, FL, EE.UU. p. 61-99.

Fischer, A.J.; Lozano, J.; Ramírez, A.; Sanint, L.R. 1993. Yield loss prediction for integrated weed management in direct-seeded rice. International Journal of Pest Management 39:175-180.

Fischer, A.; Ramírez, H.V.; Lozano, J. 1997. Suppression of junglerice (*Echinochloa colona* (L.) Link) by irrigated rice cultivars in Latin America. Agronomy Journal 89:516-521.

Fischer, A.J.; Ramírez, H.V.; Gibson, K.D.; da Silveira-Pinheiro, B. 2001. Competitiveness of semidwarf upland rice cultivars against palisadegrass (*Brachiaria brizantha*) and signalgrass (*B. decumbens*). Agronomy Journal 93:967-973.

Fischer, A.J.; Cheetham, D.P.; de Prado, R. 2004a. Enhanced effect of thiobencarb on bispyribac-sodium control of *E. phyllopogon* (Stapf) Koss in California rice (*Oryza sativa* L.). Weed Biology and Management 4:206-212.

Fischer, A.J.; Cheetham, D.P.; Laca, E.A.; McKenzie, K.S.; Gealy, D.R. 2004b. Outcrossing study between transgenic herbicide-resistant rice and non-transgenic rice in California. In: Ferrero, A.; Vidotto, F. (eds.). Memorias de la conferencia Challenges and Opportunities for Sustainable Rice-Based Production Systems celebrada en Turín, Italia, del 13 al 15 de septiembre de 2004. Edizioni Mercurio, Vercelli, Italia. p. 407-408.

Gardner, S.N.; Gressel, J.; Mangel, M. 1998. A revolving dose strategy to delay the evolution of both quantitative vs. major monogene resistances to pesticides and drugs. International Journal of Pest Management 44:161-180.

Gealy, D.R.; Mitten, D.H.; Rutger, J.N. 2003. Gene flow between red rice (*Oryza sativa*) and herbicide-resistant rice (*O. sativa*): Implications for weed management. Weed Technology 17:627-645.

Gibson, K.D.; Fischer, A.J. 2004. Competitiveness of rice cultivars as a tool for crop-based weed management. In: Inderjit (ed.). Weed biology and management. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Holanda. p. 518-537.

Gibson, K.D.; Fischer, A.J.; Foin, T.C.; Hill, J.E. 2002. Implications of delayed *Echinochloa* spp. germination and duration of competition for integrated weed management in water-seeded rice. Weed Research 42:351-358.

Gressel, J.; Segel, L.A. 1990. Modelling the effectiveness of herbicide rotations and mixtures as strategies to delay or preclude resistance. Weed Technology 4:186-198.

Grossmann, K.; Kwiatkowski, J. 2000. The mechanism of quinclorac selectivity in grasses. Pesticide Biochemistry and Physiology 66:83-91.

Heap, I.M. 2005. International survey of herbicide resistant weeds. Disponible en: www.weedscience.org

Itoh, K,; Wang, G.X.; Ohba, S. 1999. Sulfonylurea resistance in *Lindernia micrantha*, an annual paddy weed in Japan. Weed Research 39:413-423.

Jander, G.; Baerson, S.R.; Hudak, J.A.; González, K.A.; Gruys, K.J.; Last, R.L. 2003. Ethylmethanesulfonate saturation mutagenesis in *Arabidopsis* to determine frequency of herbicide resistance. Plant Physiology 131:139-146.

Jasieniuk, M.; Brule-Babel, A.L.; Morrison, I.N. 1996. The evolution and genetics of herbicide resistance in weeds. Weed Science 44:176-193.

Maxwell, B.D.; Roush, M.L.; Radosevich, S.R. 1990. Predicting the evolution and dynamics of herbicide resistance in weed populations. Weed Technology 4:2-13.

Morrison, I.N.; Friesen, L.F. 1996. Herbicide resistant weeds: Mutation, selection, misconception. Memorias del Second International Weed Control Congress celebrado en Copenhagen, Dinamarca, v.2, p. 377-385.

Moss, S.R. 2002. Herbicide-resistant weeds. In: Naylor, (ed.). Weed management handbook. Blackwell, Oxford, Reino Unido. p. 225-252.

Olofsdotter, M.; Valverde, B.E.; Madsen, K.H. 2000. Herbicide resistant rice (*Oryza sativa* L.): Global implications for weedy rice and weed management. Annals of Applied Biology 137:279-295.

Olofsdotter, M.; Jensen, L.B.; Courtois, B. 2002. Improving crop competitive ability using allelopathy: An example from rice (*Oryza sativa* L.). Plant Breeding 121:1-9.

Osuna, M.D.; Vidotto, F.; Fischer, A.J.; Bayer, D.E.; de Prado, R.; Ferrero, A. 2002. Cross-resistance to bispyribac-sodium and bensulfuron-methyl in *Echinochloa phyllopogon* and *Cyperus difformis*. Pesticide Biochemistry and Physiology 73:9-17.

Ritz, C.; Streibig, J.C. 2005. Bioassay analysis using R. Journal of Statistical Software 12(5):1-22.

Ryan, G.F. 1970. Resistance of common groundsel to simazine and atrazine. Weed Science 18:614-616.

Shibuya, K.; Yoshioka, T.; Saitoh, S.; Yoshida, S.; Hashiba, T. 1999. Analysis of acetolactate synthase genes of sulfonylurea herbicides-resistant and -susceptible biotypes in *Scirpus juncoides*. Journal of Weed Science and Technology 44 (Suppl):72.

Streibig, J.C.; Rudemo, M.; Jensen, J.E. 1993. Dose response curves and statistical models. In: Streibig, J.C.; Kudsk, P. (eds.). Herbicide bioassays. CRC, Boca Ratón, FL, EE.UU. p. 30-55.

Tsuji, R.; Fischer, A.J.; Yoshino, M.; Roel, A.; Hill, J.E.; Yamasue, Y. 2003. Herbicide-resistant late watergrass (*Echinochloa phyllopogon*): Similarity in morphological and amplified fragment length polymorphism traits. Weed Science 51:740-747.

Uchino, A.; Watanabe, H. 1999. Mutation in the acetolactate synthase genes of sulfonylurea-resistant biotype of *Lindernia* spp. Weed Biology and Management 2:104-109.

Valverde, B.E.; Itoh, K. 2001. World rice and herbicide resistance. In: Powles, S.B.; Shaner, D.L. (eds.). Herbicide resistance and world grains. CRC, Boca Ratón, FL, EE.UU. p. 195-249.

Valverde, B.E.; Riches, C.R.; Caseley, J.C. 2000. Prevención y manejo de malezas resistentes a herbicidas en arroz: Experiencias en América Central con *Echinochloa colona*. Cámara de Insumos Agropecuarios, Costa Rica. 135 p. Disponible también en: www.weedscience.org

Wang, G.X.; Watanabe, H.; Uchino, A.; Itoh, K. 1998. Gene flow in an experimental population of sulfonylurea resistant *Monochoria korsakowii*. Journal of Weed Science and Technology 43(Suppl.):42.

Yun, M.S.; Yogo, Y.; Miura, R.; Yamasue, Y.; Fischer, A.J. 2005. Cytochrome P-450 monooxygenase activity in herbicide-resistant and -susceptible late watergrass (*Echinochloa phyllopogon)*. Pesticide Biochemistry and Physiology 83:107-114.

Fuentes adicionales de información

Información actualizada sobre la resistencia a los herbicidas puede encontrarse en los siguientes sitios web:

- Herbicide Resistance Action Committee: www.plantprotection.org/HRAC/
- International Survey of Herbicide Resistant Weeds: www.weedscience.com/
- Weed Resistance Action Group: www.pesticides.gov.uk/rags.asp?id=714
- Western Australian Herbicide Resistance Initiative: www.wahri.uwa.edu.au/



ISBN 978-958-694-102-0