

Sorgo para suelos ácidos

CIAT



International Sorghum and Millet Program (INTSORMIL)

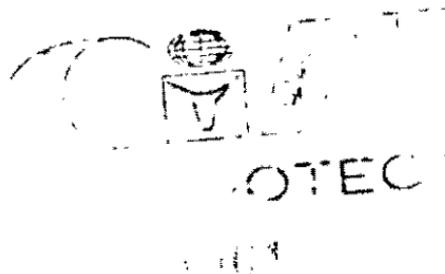
International Crops Research Institute for the
Semi-Arid Tropics (ICRISAT)

Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT)



ISBN 958-9183-11-5

Sorgo para suelos ácidos



Editado por
José G. Salinas y Lynn M. Gourley



INTSORMIL International Sorghum and
Millet Program



ICRISAT International Crops Research
Institute for the Semi-Arid
Tropics

CiAT Centro Internacional de Agricultura Tropical

Centro Internacional de Agricultura Tropical
Apartado aéreo 6713
Cali, Colombia

Publicación CIAT No. 150

ISBN 958-9183-11-5

Tiraje: 500 ejemplares

Impreso en Colombia

Junio 1990

Publicado también en inglés, junio 1987 (ISBN 84-89206-64-3)

CIAT (Centro Internacional de Agricultura Tropical). 1990. Sorgo para suelos ácidos. Memorias de un taller sobre la evaluación del sorgo por su tolerancia a los suelos tropicales de América Latina que contienen aluminio tóxico, Cali, Colombia, mayo 28 a junio 2 de 1984. Salinas, J. G. y Gourley, L. M. (eds.). Cali, Colombia. 354 p.

I. Sorgo — América Latina — Congresos, conferencias, etc. 2. Sorgo — Suelos — Congresos, conferencias, etc. 3. Suelos — América tropical — Congresos, conferencias, etc. 4. Suelos — Contenido de aluminio — Congresos, conferencias, etc. I. Salinas, José G. II. Gourley, Lynn M. III. Taller sobre la Evaluación del Sorgo por su Tolerancia a los Suelos Tropicales de América Latina que Contienen Aluminio Tóxico (1984: CIAT, Cali, Colombia). IV. International Sorghum and Millet Program. V. International Crops Research Institute for the Semi-Arid Tropics. VI. Centro Internacional de Agricultura Tropical.

Contenido

	Página
Acrónimos y Abreviaturas	vii
Prefacio	ix
REPRESENTANTES DE INSTITUCIONES PATROCINADORAS	1
Bienvenida al CIAT y la Necesidad de Investigar en Sorgo en América Latina Douglas R. Laing	3
El Papel de INTSORMIL y de Otros Programas que Apoyan la Investigación, en la Investigación Internacional R. Rodney Foil	5
INTSORMIL: lo que Tenemos para Ofrecer Glen J. Vollmar	11
Investigación del ICRISAT sobre Sorgo en los Trópicos Semiáridos J. M. Peacock	17
El Cultivo del Sorgo en Colombia y sus Posibilidades en los Suelos Acidos de los Llanos Orientales Manuel Torregroza C.	37 ✓
SUELOS TROPICALES	47
Suelos Tropicales: Clasificación y Características S. W. Buol	49
Disponibilidad del Fósforo en los Suelos Acidos del Trópico Americano Luis A. León	63
Metodología para el Análisis de los Suelos Tropicales Octavio Mosquera V.	79 ✓

	Página
RELACIONES SUELO-PLANTA	91
Estrategias para el Uso y Manejo de los Suelos Acidos en América Tropical	
José G. Salinas y Carlos E. Castilla	93 ✓
Una Nueva Metodología para Seleccionar Cultivares Tolerantes al Aluminio y con Alto Potencial de Rendimiento	
J. J. Nicholaides, III y M. I. Piha	109
El Calcio y la Penetración de las Raíces en Suelos Altamente Intemperizados	
K. D. Ritchey, D. M. G. Souza y J. E. Silva	123
Evaluación del Sorgo en los Llanos Venezolanos	
Héctor Mena T.	141
Efecto Potencial del Sorgo Granífero en los Sistemas Agropecuarios de las Regiones de Suelos Acidos del Trópico Latinoamericano	
Carlos Seré y Rubén Darío Estrada	153 ✓
MEJORAMIENTO Y SELECCION	177
Técnicas Efectivas de Selección para Buscar Tolerancia a la Toxicidad del Aluminio	
R. H. Howeler	179
Tolerancia a la Toxicidad del Aluminio en Arroz de Secano para Suelos Acidos	
César P. Martínez y Surapong Sarkerung	197 ✓
Metodología de Selección por Eficiencia en el Uso del Fósforo y por Tolerancia a la Toxicidad del Aluminio y del Manganeso en el Frijol (<i>Phaseolus vulgaris</i> L.)	
M. Thung, J. Ortega y O. Erazo	207
Colección Mundial del Germoplasma de Sorgo y su Conservación	
Vartan Guiragossian y Melak H. Mengesha	223
Planes para Mejorar el Sorgo respecto al Uso Eficiente del Fósforo	
N. Seetharama, K. R. Krishna, T. J. Rego y J. R. Burford	239

	Página
Evaluación de Elementos Minerales en el Sorgo Cultivado en Suelos Acidos Tropicales R. B. Clark y L. M. Gourley	263
Mejoramiento de Sorgos Tolerantes al Aluminio R. A. Borgonovi, R. E. Schaffert y G. V. E. Pitta	285
Búsqueda y Uso del Germoplasma Exótico de Sorgo Tolerante al Aluminio Lynn M. Gourley	309
GRUPOS DE TRABAJO	327
Informe de la Sesión de Trabajo del Grupo 1 (Científicos)	329
Informe de la Sesión de Trabajo del Grupo 2 (Administradores)	337
Participantes	341
Indice	351

Acrónimos y Abreviaturas

AICSIP	All India Coordinated Sorghum Improvement Project
AID	Agency for International Development
ATP	Trifosfato de adenosina
BIFAD	Board for International Food and Agricultural Development
CAAS	Chinese Academy for Agricultural Sciences
CENIAP	Centro Nacional de Investigaciones Agropecuarias
CGIAR	Consultative Group for International Agricultural Research
CIAT	Centro Internacional de Agricultura Tropical
CIMMYT	Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo
CNPAF	Centro Nacional de Pesquisa em Arroz e Feijão
CNPMS	Centro Nacional de Pesquisa de Milho e Sorgo
CPAC	Centro de Pesquisa Agropecuária dos Cerrados
CRI	Centro Regional de Investigación
CRSP	Collaborative Research Support Program
CVC	Corporación Autónoma Regional del Cauca
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
FAO	Food and Agriculture Organization of the United Nations
FMI	Fondo Monetario Internacional
FONAIAP	Fondo Nacional de Investigaciones Agropecuarias
GTZ	Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit
IAC	Instituto Agronômico de Campinas
IARC	International Agricultural Research Center
IBPGR	International Board for Plant Genetic Resources
ICA	Instituto Colombiano Agropecuario
ICAR	Indian Council of Agricultural Research
ICRISAT	International Crops Research Institute for the Semi-Arid Tropics
IDRC	International Development Research Centre
IFDC	International Fertilizer Development Center
IICA	Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura
IITA	International Institute for Tropical Agriculture
INIA	Instituto Nacional de Investigaciones Agrícolas
INIPA	Instituto Nacional de Investigaciones y Promoción Agraria

INRA	Institut National de Recherches Agronomiques
INTA	Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria
INTSORMIL	International Sorghum and Millet Program
IPA	Empresa Pernambucana de Pesquisa Agropecuária
IRAT	Institut de Recherches Agronomiques Tropicales et des Cultures Vivrières
IRRI	International Rice Research Institute
JCARD	Joint Committee on Agricultural Research and Development
JUNAC	Junta del Acuerdo de Cartagena
NBPGR	National Board for Plant Genetic Resources
NSSL	National Seed Storage Laboratory
ODA	Overseas Development Administration
ORSTOM	Office de la Recherche Scientifique et Technique d'Outre-Mer
SAFGRAD	Semi-Arid Food Grain Research and Development
SCS	Soil Conservation Service
SFC	Superfosfato común
SINCA	Sorghum Improvement Conference of North America
SMIC	Sorghum and Millets Information Centre
TEA	Trietanolamina
TROPSOILS	Tropical Soils Program of North Carolina State University
TVA	Tennessee Valley Authority
UNL	University of Nebraska at Lincoln
USAID	United States Agency for International Development
USDA	United States Department of Agriculture
'bófer'	Solución tampón o amortiguadora (tecnicismo por buffer, inglés)
CV	Coefficiente de variación
ES	Error estándar
hr (h)	Hora
p.e. (p. ej.)	Por ejemplo
UA	Unidad animal

Punto decimal:	0.87, 0.05, 31.3
Unidades de mil:	2340, 1280, 9995 10,127; 43,900; 127,000

Prefacio

Las extensas áreas de tierra subutilizadas del trópico constituyen las fronteras agrícolas de hoy. Una de las principales razones por las cuales estas áreas siguen siendo marginales para la producción agrícola, son sus suelos ácidos e infértiles. Desde hace muchos años se conoce la tecnología que permite a estas áreas de suelos ácidos alcanzar un potencial de producción agrícola igual al de la tierra cultivable de las zonas templadas. Sin embargo, esta tecnología no ha sido adoptada exitosamente en la mayoría de los países tropicales debido a limitantes como la falta de acceso al capital, los sistemas inadecuados de transporte y mercadeo, y el alto costo y suministro inadecuado de insumos de producción para los agricultores de escasos recursos. Por consiguiente, la mayor parte de aquella población del mundo crónicamente pobre y subalimentada se encuentra en los países del trópico.

Son pocas las especies cultivables que crecen bien en estos suelos ácidos lixiviados; la causa primordial son las limitaciones edáficas como la toxicidad por aluminio, la fijación del fósforo, las deficiencias de macroelementos y microelementos, y la toxicidad por manganeso. Estas limitaciones plantean retos adicionales a la mayoría de las especies cultivables comerciales y a muchas de las de subsistencia. Se ha identificado, por fortuna, variabilidad genética, tanto entre las especies vegetales cultivadas como dentro de ellas, en la tolerancia de éstas a las limitaciones impuestas por los suelos ácidos, hallazgo que elimina el requerimiento de la planta por grandes cantidades de insumos de producción.

La producción de sorgo presenta actualmente, entre las de los principales cereales, la tasa más alta de crecimiento en América Latina, tanto en términos de área sembrada como de producción total. Los rendimientos del sorgo disminuyen a medida que ingresan a la producción más tierras marginales. No se ha medido aún la variabilidad genética del sorgo por su tolerancia a los suelos ácidos, cuando se emplea una tecnología de bajos insumos. Hay más de 22,000 accesiones en la colección mundial de

sorgo, y sólo unas pocas han sido evaluadas en los suelos ácidos del trópico. Muchas de las técnicas publicadas de selección por tolerancia al aluminio no se han validado a nivel de campo, y pocas han medido el resultado final de la producción: el rendimiento de grano.

Por invitación del Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), el International Sorghum and Millet Collaborative Research Support Program (INTSORMIL-CRSP) inició un proyecto para seleccionar y mejorar el sorgo por su adaptación a los ecosistemas de suelos ácidos. El proyecto se encuentra actualmente en la tercera época de evaluación (primer semestre de 1984).

Al comienzo de este proyecto, se planeó una pequeña reunión de trabajo con objetivos muy específicos para informar a los programas nacionales agrícolas de América Latina (de países con extensas áreas de suelos ácidos) sobre el propósito del programa colombiano de INTSORMIL. Se eligieron voceros que compartieran sus ideas y resultados sobre las técnicas de selección de campo en suelos ácidos tropicales utilizadas para evaluar la tolerancia a la toxicidad por aluminio del sorgo y de otros cultivos.

El propósito y las metas de esta reunión fueron los siguientes:

Reunir a fitomejoradores, fisiólogos, edafólogos y administradores agrícolas dedicados a la investigación de los suelos ácidos tropicales, en un taller que estudie la situación actual del problema.

Definir las áreas de América Latina donde los cultivares de sorgo tolerantes al aluminio harían el mayor impacto inicial de producción y utilización. (Se sobreentiende que la investigación presentada en estas memorias también sería útil para científicos de otras regiones tropicales donde los suelos ácidos limiten la producción de los cultivos.)

Discutir sobre el futuro intercambio de información y de germoplasma de sorgo con todos los programas de investigación de América Latina y con las agencias internacionales de investigación.

Planear, para los próximos cinco años, las funciones de los programas nacionales de América Latina de INTSORMIL y del International Crops Research Institute for the Semi-Arid Tropics (ICRISAT), respecto al desarrollo de la investigación de sorgo en los ecosistemas de suelos ácidos.

Los participantes agradecen sinceramente el apoyo de los patrocinadores de esta reunión, a saber, INTSORMIL, ICRISAT, CIAT e ICA (Instituto Colombiano Agropecuario), y también la contribución adicional del CIAT, que como anfitrión de la reunión, proporcionó para ella las instalaciones y el personal administrativo, y facilitó la publicación de estas memorias.

José G. Salinas
CIAT, Cali, Colombia

Lynn M. Gourley
Universidad Estatal de Mississippi, E.U.

REPRESENTANTES DE INSTITUCIONES PATROCINADORAS

Bienvenida al CIAT y la Necesidad de Investigar en Sorgo en América Latina

25 de mayo de 1977

Douglas R. Laing*

En nombre del Dr. John Nickel y de mis colegas quiero darles a Uds. una calurosa bienvenida al CIAT. Es un gran placer para mí tener la oportunidad de decir unas cuantas palabras en la apertura de este taller de trabajo sobre el sorgo y su adaptabilidad a los suelos ácidos de los trópicos.

Como todos ustedes saben, los trópicos están formados en gran parte por suelos ácidos, particularmente en América Latina, donde extensas áreas de sabanas ácidas bien irrigadas esperan ser habilitadas para la agricultura. En el CIAT, el Programa de Pastos Tropicales, ha enfocado su atención a estas áreas con el fin de desarrollar combinaciones de pastos y leguminosas que se adapten a suelos ácidos. Además, la investigación en los Programas de Yuca y de Arroz se ha dirigido, durante varios años, hacia el desarrollo de cultivos alternos con adaptación similar.

Claramente, nuestro objetivo es desarrollar componentes tecnológicos, en cooperación con las instituciones nacionales de investigación, que de una parte, se adapten a estas particulares condiciones climáticas y edáficas, y de otra, puedan formar parte integrante de sistemas de cultivo que comprendan tanto la fase de pasturas como la de cultivos alimenticios.

Una rápida adopción de los nuevos sistemas de pasturas que se desarrollan en la red de evaluación de pastos en América Latina dependerá, en cierto grado, de la existencia de una fase de cultivo viable que proporcione el estímulo económico necesario para el desarrollo integrado de sistemas agrícolas estables en estas zonas de frontera.

En este trabajo, uno de los factores clave que guía la investigación es la necesidad de desarrollar componentes tecnológicos

* Director General Adjunto, CIAT, Cali, Colombia.

de bajo costo que no requieran la aplicación intensa de insumos comprados, y que ciertamente no intenten disminuir drásticamente el nivel de acidez de los suelos mediante la adición de cal.

Esta consideración me lleva al sorgo. En el 'Plan a Largo Plazo del CIAT para la Década de los Ochenta', publicado en 1981, hemos analizado el escenario futuro de diversos productos agrícolas que se cultivan en la región latinoamericana, incluyendo aquéllos que son objeto de estudio en el CIAT. Se concluyó que dos cultivos, 'el sorgo y la soya', no estaban recibiendo la debida importancia en la investigación, ni en los países ni internacionalmente, que guardara relación con la demanda futura de estos productos. En el 'Plan del CIAT para los Ochenta...' previmos la posibilidad de colaborar con otras instituciones para estimular la investigación en estos cultivos, particularmente para los suelos ácidos de los trópicos; esa investigación complementaría el trabajo que se hace en los cultivos asignados al CIAT.

Consecuentemente, en 1980 nos dirigimos al International Crops Research Institute for the Semiarid Tropics (ICRISAT) y al International Sorghum and Millet Program (INTSORMIL) con la idea de que el CIAT sirviera de sede a un programa de investigación en sorgo con los fines mencionados. Rápidamente se logró un acuerdo y se firmó un memorando tripartito de entendimiento entre ICRISAT, INTSORMIL y CIAT. Poco después, INTSORMIL inició el desarrollo del proyecto en el CIAT con el nombramiento del Dr. Lynn Gourley, un mejorador de sorgo de la Universidad del Estado de Misisipí.

El CIAT ha apoyado activamente el proyecto proporcionándole la infraestructura en su sede y los canales de cooperación internacional ya establecidos en el Centro. También hemos promovido activamente la excelente investigación colaborativa que el proyecto ha desarrollado con el Instituto Colombiano Agropecuario (ICA) en Colombia. Estamos muy complacidos de haber visto el considerable progreso hecho en el mejoramiento de materiales resistentes a la acidez de los suelos, del cual se informa en este taller. El CIAT se siente también muy satisfecho de ver el excelente progreso que otras instituciones de las Américas han hecho en la investigación del problema general de la adaptación a los suelos ácidos, tema de este taller.

Deseo a ustedes éxitos en sus deliberaciones y me gustaría expresar nuestro sincero interés en insistir en el ofrecimiento de una sede para esta importante iniciativa de colaboración.

El Papel de INTSORMIL y de Otros Programas que Apoyan la Investigación, en la Investigación Internacional

*R. Rodney Foil**

Es un placer y un honor participar en esta reunión de trabajo y compartir con ustedes algunas ideas acerca del papel de INTSORMIL y de otros programas colaborativos de apoyo a la investigación (PCAI) en la investigación internacional. En 1975, el Congreso de los Estados Unidos hizo una revisión importante de nuestra legislación sobre ayuda externa, que contempló también un pasaje del Título XII llamado "Prevención de la Hambre y Liberación del Hambre". Este título, desarrollado conjuntamente por representantes de la educación superior de los Estados Unidos y por líderes políticos veteranos como el senador Hubert Humphrey y el congresista Paul Findley, estableció varios programas, nuevos y significativos, para que las universidades de los Estados Unidos participaran de los problemas del mundo en desarrollo. Una sección de ese título preveía la creación de un programa que "hiciera más efectivas las ciencias agrícolas, con el fin de aumentar el apoyo dado a largo plazo para la aplicación de la ciencia a la solución de los problemas de alimentación y nutrición de los países en desarrollo".

De esta proposición general nacieron los programas colaborativos de apoyo a la investigación, conocidos por el título corto de PCAI (CRSP en inglés) y también INTSORMIL, uno de los patrocinadores de este taller.

Varios factores hacen que el esfuerzo del CRSP sea diferente del de otros programas nacionales o internacionales. Hasta cierto punto, esos factores están incorporados en el título.

Primero, estos programas son realmente cooperativos. Representan una sociedad compuesta por las instituciones de los Estados Unidos, las instituciones cooperadoras establecidas fuera

* Director, Estación Experimental Agrícola y Forestal de Mississippi, Universidad Estatal de Mississippi, MS, E.U., y miembro del Comité Conjunto de Investigación Agrícola y Desarrollo (JCARD) de la Junta para el Desarrollo Internacional de la Alimentación y la Agricultura (BIFAD).

de ese país, y la Agencia Estadounidense para el Desarrollo Internacional (USAID). Las instituciones cooperadoras son instituciones nacionales de investigación en los países huéspedes, centros internacionales, y universidades. Tal como se diseñaron, los programas colaboran en la planeación de los proyectos, en su 'implementación', y en el suministro de los fondos que requieran. La colaboración y el apoyo económico merecen una mención especial. A diferencia de otros programas de la USAID, los CRSP requieren fondos de contrapartida cuyo monto es un 25% de la contribución de la USAID. Aunque no siempre se requiere, las instituciones extranjeras cooperantes proveen, en casi todos los casos, un apoyo adicional de contrapartida.

El concepto de colaboración en la creación de fondos es muy importante. De acuerdo con los arquitectos del programa, la contrapartida se concibió primordialmente como una expresión evidente de que existía una verdadera mutualidad de intereses. Esto es, que la institución de los Estados Unidos y la institución cooperadora extranjera disfrutarían conjuntamente del beneficio directo de la participación y demostrarían este beneficio ofreciendo una capacidad de investigación financiada localmente que podría orientarse hacia problemas globales para el beneficio de todas las partes. A medida que los CRSP maduran, esta mutualidad de intereses ha sido cada vez más evidente.

Un segundo aspecto de este programa, y muy importante, es que realmente es un programa de investigación. Los CRSP no están diseñados para ofrecer asistencia técnica, capacitación a los participantes, ayuda en creación de instituciones o transferencia de tecnología. En la mayoría de los CRSP, estos aspectos del desarrollo reciben un impacto benéfico, pero en cada caso son un subproducto de la investigación y no su objetivo principal.

Como programas de investigación, los CRSP están financiados por donaciones y no por contratos. Los CRSP, cuya naturaleza ha sido reconocida como de largo plazo, se planean conjuntamente para que enfoquen los problemas de la producción de alimentos sobre una base global o regional.

Una característica relacionada, e igualmente importante, es que los CRSP son programas de apoyo. Están diseñados, no solamente para ofrecer tecnología aplicable, sino para crear y alimentar una base de capacidad científica, vinculada a las estrategias de la USAID y sostenida por un equipo de científicos cuya experiencia y visión de los problemas son de carácter global.

Con estos principios fundamentales, la USAID y el Comité Conjunto de Investigación Agrícola y Desarrollo (JCARD) de la Junta para el Desarrollo Internacional de la Alimentación y la Agricultura (BIFAD) han pasado a institucionalizar el concepto de los CRSP. Hace seis años se aprobó la creación del primer CRSP enfocado hacia los pequeños rumiantes. Desde entonces se han creado seis más, y otro sobre el establecimiento de las reservas de pescadería está casi aprobado. Aunque los mecanismos de planeación y los procedimientos gubernamentales han evolucionado diferentemente para cada uno, todos tienen cosas en común. En cada caso, una institución universitaria de los Estados Unidos es la entidad administradora que, en conjunto con otras instituciones, dirige el esfuerzo investigativo. La orientación administrativa se da a través de juntas de representantes institucionales. La dirección técnica se recibe de comités de científicos, y hay paneles externos de evaluación que ofrecen una apreciación periódica de progreso.

Estos esfuerzos no son pequeños o insignificantes. Cuarenta instituciones de los Estados Unidos cooperan con 63 instituciones de otros países. El trabajo se lleva a cabo en treinta países. La participación de la USAID ha llegado a US\$20 millones al año, mientras que la participación total de todos los participantes excede sin duda los US\$30 millones.

Todavía es demasiado pronto para evaluar el impacto científico de este programa de investigación tan joven, pero ya se citan sus logros significativos. Algunos resultados de la investigación hecha en los Estados Unidos se han validado en otros países, y en varios sitios su implementación ya está a la vista. Aún más importante, tal vez, es la creación de redes internacionales de colaboración que están funcionando bien, prueba de lo cual es esta reunión de trabajo. En efecto, se han creado nuevas instituciones de investigación las cuales ya tienen vida propia. La naturaleza multiinstitucional y multidisciplinaria del esfuerzo de investigación es excitante para los científicos y para los administradores por igual. Es un hecho significativo que el concepto de beneficio mutuo se haya comprobado. Con pocas excepciones, los científicos e instituciones de los Estados Unidos que participan en el programa pueden señalar beneficios científicos que han servido para mejorar la agricultura de los Estados Unidos, y los científicos agrícolas de los países menos desarrollados han respondido claramente a esta nueva iniciativa.

Es sin duda de interés particular para el grupo aquí reunido saber que algunos de los primeros vínculos desarrollados por

los CRSP han alcanzado los centros internacionales de la red establecida por el Grupo Consultivo para la Investigación Agrícola Internacional (CGIAR). El trabajo cooperativo hecho aquí en el CIAT es sólo un ejemplo de la clase de actividad que se lleva a cabo en el mundo en otros centros y con otros CRSP. El interés de las misiones de la USAID y la ayuda recibida de ellas crecen rápidamente. En cada caso, los CRSP han involucrado los mejores científicos de los Estados Unidos en el proyecto o producto agrícola de interés, y han establecido un sistema en que la misión y las instituciones de los países que posiblemente acojan el programa tengan acceso a él. Dicho sistema respondía a una necesidad sentida.

Aunque el éxito del concepto de los CRSP ya se ha demostrado bastante bien, el panorama del crecimiento futuro y la creación de nuevos CRSP se muestra un poco oscuro. Hay apoyo para la continuación de los CRSP establecidos actualmente, por lo menos durante un ciclo adicional de investigación. No existen, sin embargo, recursos para establecer CRSP adicionales aunque la aprobación para establecer un CRSP que evalúe las reservas de pesca completará el primer conjunto de áreas de alta prioridad que han sido identificadas por la USAID como objeto de financiación aprobada.

Aunque la obtención de recursos adicionales no parece fácil, el liderazgo de los Estados Unidos se ha enfocado a la necesidad de reexaminar las prioridades a nivel mundial, y a intentar establecer más iniciativas de investigación. El Comité Conjunto de Investigación Agrícola y Desarrollo del BIFAD se ha comprometido a revisar las prioridades de investigación desarrolladas recientemente en las oficinas regionales de la USAID, con la meta de identificar las limitaciones que se ajusten a la prueba de mutualidad de intereses necesaria para el establecimiento de un CRSP. Cuando se complete esta revisión, se buscarán los recursos para crear CRSP adicionales.

A medida que se desarrollan los programas, se ha identificado una función dentro de la gran comunidad investigativa internacional que parece muy adecuada a las necesidades de hoy y de mañana. Por medio de los CRSP, la larga experiencia y el deseo de investigar de las instituciones de los Estados Unidos se han unido con la capacidad siempre creciente de los centros internacionales y de las instituciones de los países anfitriones de establecer una labor científica continua que pueda enfrentar los problemas principales del mundo produciendo mayores y más positivos efectos.

Una reciente evaluación global de uno de los CRSP, realizada por un panel de expertos mundiales en investigación agrícola, entregó una evaluación del concepto de CRSP que habla mejor que yo del progreso y potencial de este concepto único. Terminaré mi charla citando parte de este informe.

“De manera semejante al movimiento de hace varias décadas cuando empezó el establecimiento de una red de centros internacionales de investigación agrícola (IARC, en inglés), los CRSP aparecieron como un componente nuevo y necesario en un sistema internacional de investigación y desarrollo agrícolas. Sus características únicas representan un modelo de costos eficiente que puede desempeñar un papel internacional crítico más allá de las responsabilidades y capacidades de los IARC y de organizaciones similares de investigación. Entre las características críticas del modelo, como se demostró en este CRSP en particular, están las siguientes:

“Las dimensiones enormes de la base de recursos, que incluye la experiencia profesional, las facilidades de investigación, y la estructura de apoyo administrativo representada por el sistema de universidades de los Estados Unidos.

“La diversidad de disciplinas profesionales disponibles, a las cuales se recurrirá cuando contribuyan apropiadamente a la solución de algún problema.

“Los convenios de trabajo de colegas interesados, quienes reciben una retribución por su colaboración, a través de las fronteras nacionales, con otras naciones participantes.

“La estructura de manejo cuya única función es la integración y coordinación de todos los componentes anteriores, manteniendo a la vez el enfoque en las metas generales del programa.

“De este modo, como miembro de la nueva iniciativa de los CRSP, este programa complementa y apoya los centros internacionales de investigación agrícola y otras organizaciones públicas y privadas de investigación. Ha mostrado ser un modelo altamente aceptable e interactivo de asistencia técnica que aprovecha los diversos y abundantes recursos de excelentes entidades de los Estados Unidos, hacia una actividad colaborativa internacional de investigación y capacitación. Por medio de estos esfuerzos, los CRSP extienden la red mundial de instituciones e individuos que cooperan en esta investigación. De modo más amplio, y con el tiempo, esta red ayuda a moldear y fortalecer vínculos perdurables a través del sistema internacional de investigación y desarrollo agrícolas”.

INTSORMIL: lo que Tenemos para Ofrecer

*Glen J. Vollmar**

Bienvenidos a la Primera Reunión de Trabajo sobre Sorgo y Suelos Ácidos. INTSORMIL está muy complacido de ser uno de los patrocinadores y también un participante de este evento importante. En INTSORMIL consideramos estas reuniones de trabajo como un método de intercambiar información y de poner a prueba los procedimientos y resultados de la investigación. Esta reunión contribuye a una labor investigativa que involucra a varias naciones de América Central y del Sur. Es un proceso productivo ya que contribuye a mejorar la investigación y a compartir los conocimientos dentro de aquellos países—y entre ellos mismos— en los cuales los suelos ácidos son un problema para la producción del sorgo.

Con ayuda de una serie de diapositivas, permítanme definirles la naturaleza de INTSORMIL y lo que tenemos para ofrecer. Sorgo y millo son los cultivos alimenticios de mayor importancia en los países menos desarrollados y en la mayoría de las áreas agrícolas marginadas del mundo. Estos cultivos de grano, que son alimenticios tanto para el hombre como para los animales, fueron escogidos como los de más alta prioridad, en relación con su necesidad de investigación, en el Título XII del Programa Colaborativo de Apoyo a la Investigación (CRSP). Como resultado, el CRSP de Sorgo y Millo (INTSORMIL) fue iniciado el 1o. de julio de 1979. Su objetivo general es elevar el nivel de la nutrición humana por medio de la investigación y del desarrollo de tecnología. Para alcanzar este propósito, se le ha dado alta prioridad al entrenamiento de científicos de los países participantes y al perfeccionamiento de las instalaciones y de los procedimientos de investigación de esos países.

* Director de INTSORMIL, Universidad de Nebraska, Lincoln, Nebraska, E.U. (Este trabajo fue presentado por el Dr. Lynn M. Gourley.)

Los objetivos específicos de INTSORMIL son:

Vincular instituciones que tengan intereses comunes en la investigación del sorgo y del millo.

Movilizar y coordinar el talento investigativo.

Lograr una colaboración y un intercambio de información óptimos con las diferentes misiones de la Agencia para el Desarrollo Internacional (AID), con los centros internacionales de investigación, y con instituciones de los Estados Unidos y de los países en vías de desarrollo.

Ser responsable del programa y de su administración fiscal.

INTSORMIL es una red internacional de investigadores y de organizaciones que trabajan en aras del mejoramiento de la alimentación y la prosperidad humanas. Unos 82 científicos de ocho universidades contratadas de los Estados Unidos están colaborando con los científicos y los programas locales de los países anfitriones del CRSP, en la solución de problemas sobre la producción y utilización de sorgo y millo para alimento humano.

INTSORMIL está financiado por la Agencia para el Desarrollo Internacional, por universidades participantes del programa, por instituciones de investigación de los países anfitriones, y por donantes privados.

Las actividades colaborativas incluyen el apoyo a la investigación y a la capacitación en los siguientes sitios:

Universidades de los Estados Unidos

Universidad de Arizona

Universidad de Florida, A y M

Universidad del Estado de Kansas

Universidad de Kentucky

Universidad del Estado de Mississippi

Universidad de Nebraska

Universidad de Purdue

Universidad de Texas, A y M

Países anfitriones

INTSORMIL se encuentra comprometido con los programas de investigación nacionales y centros de investigación internacionales de los siguientes países:

Mali, Sudán, Botswana, Honduras, Filipinas, India, México, Tanzania, Colombia, Niger, Burkina Faso, Egipto y Brasil.

Centros internacionales de investigación

INTSORMIL está vinculado con los siguientes centros internacionales:

CIAT (Centro Internacional de Agricultura Tropical), en Colombia

CIMMYT (Centro Internacional para el Mejoramiento del Maíz y el Trigo), en México

ICRISAT (Instituto Internacional de Investigación en Cultivos para los Trópicos Semi-Aridos), en India

IRRI (Instituto Internacional para la Investigación en Arroz), en Filipinas

También existen lazos de cooperación con SAFGRAD (Instituto para Investigación y Desarrollo de Granos Alimenticios en Regiones Semi-Aridas), con FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura) y otras organizaciones cuyos objetivos incluyen el mejoramiento del sorgo y del millo.

Los investigadores de INTSORMIL, localizados en los Estados Unidos y en los países anfitriones, llevan a cabo proyectos de investigación sobre sorgo y millo en las siguientes áreas:

- agronomía, prácticas culturales;
- fisiología, especialmente el estrés que soporta la planta;
- genética y mejoramiento varietal;
- entomología y control de insectos;
- patología vegetal;
- almacenamiento, utilización y nutrición; y
- socioeconomía, algunas consideraciones.

INTSORMIL hace énfasis en la 'investigación colaborativa' entre los investigadores que trabajan con sorgo y millo. Los científicos de INTSORMIL trabajan cooperativamente con sus colegas de otros países en una empresa de investigación conjunta en que se comparten conocimientos, técnicas de investigación y material genético. Asimismo, colaboran activamente en la capacitación de científicos de países en vías de desarrollo tanto en los programas universitarios a nivel de posgrado como en trabajos de seminario.

La semilla de materiales mejorados y seleccionados se pone a disposición de los investigadores en sorgo y millo a nivel mundial. Los científicos de INTSORMIL cooperan con una red internacional de germoplasma que ensaya materiales genéticos de sorgo y millo en todo el mundo. ICRISAT, en Hyderabad, India, mantiene un banco internacional de materiales genéticos de sorgo y millo, al cual INTSORMIL envía también materiales.

INTSORMIL financia la publicación de memorias de reuniones y de informes de investigación sobre sorgo y millo. Como un ejemplo, INTSORMIL ayuda a financiar la publicación de las memorias de una Reunión de Trabajo reciente llamada **El Sorgo en los 80**. También da apoyo financiero al **Boletín Informativo de Sorgo** publicado por SICNA (Conferencia sobre el Mejoramiento del Sorgo de América del Norte).

Los científicos de INTSORMIL de Estados Unidos y de los países anfitriones del programa intercambian información relacionada con su investigación. Esta labor se realiza en simposios, reuniones de trabajo, mediante la correspondencia y las discusiones personales, en revisiones de investigación, y en revistas especializadas y boletines informativos.

INTSORMIL concede alta prioridad a la capacitación de aquellos científicos de los países anfitriones del programa que tendrán un alto grado de responsabilidad en la investigación del sorgo y el millo en sus países. Dicha capacitación va desde la participación en seminarios e intercambios de científicos hasta los programas formales de estudio a nivel de posgrado. Algunos de estos estudiantes completan sus cursos en los Estados Unidos y hacen su trabajo de tesis o de disertación doctoral en sus países de origen.

En resumen, el papel de INTSORMIL, en lo que a investigación de sorgo se refiere, es el de vincularse con quienes tengan interés en el sorgo y el millo, contribuyendo con su colaboración investigativa y de liderazgo. La colaboración entre los institutos nacionales de investigación, los Centros Internacionales (en este caso, CIAT e ICRISAT), e INTSORMIL genera una especie de habilidad investigativa y de impulso solidario que conducirán sin duda al mejoramiento de la producción y la utilización del sorgo allí donde haya problemas con suelos ácidos, estrés en la producción relacionado con sequías y otras condiciones climáticas, insectos dañinos, enfermedades, y dificultades para el almacenamiento y la utilización del grano.

Creemos que las reuniones de trabajo y la capacitación de estudiantes de América Latina diseminarán los conocimientos actualizados sobre el sorgo y darán continuidad al trabajo realizado por el Dr. Lynn Gourley y por otros de entre ustedes en la investigación con suelos ácidos. Los resultados han sido, hasta ahora, impresionantes, pero creo que ustedes estarán de acuerdo en que todavía hace falta mucha investigación.

La contribución de INTSORMIL a la investigación de sorgo y de suelos ácidos recibe un decidido apoyo del Comité Técnico, de la Junta Directiva, y del Grupo de Evaluación Externa de INTSORMIL. La Universidad del Estado de Mississippi tiene a su cargo el liderazgo del proyecto y se halla en el proceso de alistar un científico para investigación en sorgo, quien continuará dicha investigación cuando el Dr. Gourley regrese a los Estados Unidos en noviembre de este año.

Hago un llamado a ustedes para que participen y hagan todo cuanto puedan en este importante esfuerzo de investigación.



Investigación del ICRISAT sobre ²³Sorgo en los Trópicos Semiáridos

*J. M. Peacock**

ICRISAT

El ICRISAT (Instituto Internacional de Investigación en Cultivos para los Trópicos Semiáridos) es uno de los 13 centros internacionales de una red mundial de investigación dedicados a mejorar la producción de alimentos en los países menos desarrollados (CGIAR, 1980). El mandato dado al ICRISAT es mejorar el rendimiento, la estabilidad y la calidad alimenticia de cinco cultivos básicos para la vida en los trópicos semiáridos (TSA), y desarrollar sistemas de cultivo que hagan un uso máximo tanto de los recursos humano y animal como de las lluvias limitadas de la región.

Los trópicos semiáridos estacionalmente secos están distribuidos en casi veinte millones de kilómetros cuadrados del planeta y cubren, en todo o en parte, 50 naciones en cinco continentes. Incluyen buena parte del Asia del sur, algunas partes de Asia suroriental, de Asia occidental, y de Australia, dos amplios cinturones de Africa, algunas áreas de América del Sur y Central, y gran parte de México (Figura 1).

Los TSA son una región difícil de lluvias erráticas y limitadas, con suelos pobres en nutrientes (Sivakumar y Virmani, 1982); está poblada por más de 700 millones de habitantes, la mayoría de los cuales vive en niveles de subsistencia y depende de la limitada producción de alimentos de sus pequeñas fincas. La sede del ICRISAT está en Patancheru, India, a 26 km al noroeste de Hyderabad; el instituto tiene también personal científico distribuido en nueve países de Africa, en México, en Siria y en varias estaciones de investigación de la India. Las operaciones principales de Africa están en Niger, Burkina Faso, Senegal, Mali, Nigeria, Sudán, Kenya, Malawi, y Zimbabwe.

* Fisiólogo principal, Programa de Mejoramiento de Sorgo, ICRISAT, Patancheru, Andhra Pradesh, India.



Figura 1. Regiones semiáridas (sombreadas que caen bajo la responsabilidad de ICRISAT. Los puntos señalan la ubicación de la sede de ICRISAT en India, del Centro del Sahel en Niger, y de las estaciones de investigación que colaboraran con ICRISAT y donde hay personal residente de este instituto.

Capacitación

Como esta es una reunión de trabajo internacional sobre capacitación y enseñanza, haré algunos comentarios acerca de las actividades de capacitación del ICRISAT, que son uno de los aspectos más importantes de nuestro trabajo. Cada año, científicos agrícolas y asistentes técnicos vienen de varios países para aprender acerca de nuestra labor de investigación y mejorar sus propias habilidades. En 1983, un total de 144 personas de 37 países recibieron capacitación en ICRISAT: 66 de ellos en servicio, 22 en investigación para posgrado, 12 asociados en servicio, y 3 asociados en investigación. Cuatro científicos completaron además sus estudios de posdoctorado. Noventa científicos del ICRISAT colaboraron con este programa de capacitación.

La capacitación dada en otros países beneficia a 15 científicos que han trabajado con los mejoradores de sorgo y agrónomos de ICRISAT destacados en México, y a estudiantes de Mali quienes trabajaron para su tesis con nuestro agrónomo y nuestro mejorador de cereales en Mali. Hemos sido alentados particularmente por el progreso que nuestros científicos han hecho en América Central y en México; desde 1975 se han capacitado 27 personas en El Salvador, Colombia, Nicaragua, Guatemala, Panamá, Venezuela, y más de 60 han tomado cursos cortos en México. Esperamos poder identificar durante esta reunión más candidatos para su capacitación en América Latina.

Otro canal de capacitación es el centro de información sobre sorgo y millos (SMIC), que produce un boletín y una bibliografía anual sobre sorgo y millo (SMIC, 1984). SMIC ofrecerá, por pedido, cualquier reimpresión, bibliografía específica, o informe actualizado. ICRISAT produce también una gran variedad de publicaciones sobre el sorgo por intermedio de sus Servicios de Información; éstas aparecen en un catálogo (ICRISAT, 1984a) y se obtienen fácilmente en los Servicios de Información.

El Sorgo: Distribución Mundial, Domesticación y Uso

No se sabe cuándo se cultivó por primera vez el sorgo [*Sorghum bicolor* (L.) Moench] pero Murdock (1959) sugiere que, así como otros cultivos de África occidental, fue domesticado en África oriental hace más de siete mil años. Se piensa que no

llegó a la India antes del año 1500 a.C. y a la China alrededor del 900 d.C.

El sorgo cultivado fue introducido por primera vez en América y Australia hace más o menos 100 años; desde entonces, la domesticación y el cultivo del sorgo se han diseminado por el mundo y hoy se siembra en 47.8 millones de hectáreas (FAO, 1982) como el quinto cereal, en área sembrada, después del trigo, el arroz, el maíz y la avena. Las áreas de mayor producción son hoy las grandes planicies de América del Norte, el Africa al sur del Sahara, la parte nororiental de China, la meseta Decan del centro de India, y Argentina.

Los rendimientos potenciales del sorgo son similares a los de otros cereales importantes. Pickett y Fredericks (1959) y Fisher y Wilson (1975) informaron sobre rendimientos superiores a 14,000 kg/ha. No obstante, el sorgo ha alcanzado su importancia no tanto como un cereal de alto rendimiento sino como un cultivo bien adaptado a los trópicos áridos y semiáridos. Los rendimientos promedio en el mundo en desarrollo están cerca de 1000 kg/ha, variando entre un mínimo de 660 kg/ha en algunas partes de Africa hasta un máximo de 3127 kg/ha en América Latina. Los usos actuales del grano son numerosos pero es más importante como alimento humano en las zonas tropicales y como alimento animal en los climas más templados. Los tallos del sorgo y su follaje se utilizan a menudo como forraje para animales, y en algunas áreas los tallos se usan para la construcción y como combustible.

Objetivo General del Programa de Mejoramiento de Sorgo

Todos reconocemos que los bajos rendimientos obtenidos en el mundo en desarrollo son el resultado de la acción e interacción de muchos factores, y que no hay una solución simple que pueda 'implementarse' fácilmente. La preocupación principal del ICRISAT está en las interacciones de los factores biológicos, climáticos, edáficos y de manejo, y en el desarrollo de una tecnología de producción que, bajo un ambiente socio-político-económico apropiado, traiga como resultado un aumento en la producción de sorgo que se sostenga de modo continuado. Para lograr tal objetivo, el programa ha identificado varias características que son prioridades en el mejoramiento del sorgo (Cuadro 1) y éstas forman la base de nuestro programa de investigación.

Cuadro 1. Características del sorgo que reciben prioridad en el programa de mejoramiento de sorgo del ICRISAT.

Característica	Descripción
Rendimiento de grano	Más alta y más estable
Calidad del grano	Calidad alimentaria y nutricional aceptables
Resistencia al estrés ambiental	
Fuerzas abióticas:	
Sequía	Estrés causado por el agua, la temperatura, y la falta de nutrientes
Establecimiento del cultivo	Emergencia de la semilla a pesar de la costra del suelo y de la temperatura alta de la superficie
Fuerzas bióticas:	
Plagas (insectos)	Mosca del cogollo, barrenador del tallo, mosca del vástago, chinches de la panícula
Enfermedades	Hongos del grano, podredumbres del tallo, mildiú vellosa del sorgo, enfermedades de la hoja
Estriga	<i>Striga hermonthica</i> y <i>S. asiatica</i>

En pocas palabras, nuestro objetivo general es desarrollar variedades de rendimiento alto y estable e híbridos cuyo grano tenga una calidad alimenticia aceptable. Nuestro fin último es mejorar la producción de sorgo de los pequeños agricultores en los países en desarrollo del mundo.

Organización y Estrategia de Investigación

El área de los TSA donde el ICRISAT cumple su mandato ha sido dividida (ICRISAT, 1980) en nueve regiones geográficas (Cuadro 2) cada una de más o menos 8 a 12 países vecinos. El Cuadro 3 muestra las cinco regiones que se han designado como zonas prioritarias junto con datos sobre rendimiento promedio y área bajo cultivo. El ICRISAT tiene ahora programas de investigación en estas cinco regiones. A medida que estos programas se establezcan en estas zonas y trabajen en más estrecha relación con los programas nacionales, su responsabilidad principal serán las actividades de investigación regional. Sin embargo, hay una interacción fuerte con los científicos del Centro que se manifiesta en visitas de científicos, intercambio de germoplasma y de líneas mejoradas, reuniones de trabajo colaborativas, y revisiones anuales internas.

Cuadro 2. Regiones geográficas donde se produce el sorgo.

Región No.	Continente y (país)
1	Subcontinente de la India y Asia suroriental (India, Bangladesh, Pakistán, Ceilán, Tailandia)
2	Africa occidental y Sudán (Benin, Camerún, Gambia, Ghana, Guinea, Guinea Bissau, Mali, Niger, Nigeria, Sierra Leona, Senegal, Sudán, Burkina Faso)
3	Africa oriental y Yemen (Burundi, Etiopía, Kenya, Ruanda, Somalia, Tanzania, Uganda, Yemen)
4	Africa meridional (Angola, Botswana, Madagascar, Malawi, Mozambique, Namibia, Zaire, Zimbabwe)
5	América Central y México (Costa Rica, República Dominicana, El Salvador, Guatemala, Haití, Honduras, México, Antillas Holandesas, Nicaragua)
6	América del Sur (Argentina, Bolivia, Brasil, Colombia, Paraguay, Venezuela)
7	Lejano Oriente (China, Japón, Corea)
8	América, zona templada
9	Oceanía (Australia)

FUENTE: ICRISAT, 1982.

Cuadro 3. Rendimientos promedio, área cultivada, y porcentaje del área mundial sembrada de sorgo, en las cinco regiones geográficas donde hay producción importante de ese cereal y donde están ubicados los científicos del ICRISAT.

Región geográfica principal	Rendimiento promedio (kg/ha)	Area (miles de ha)	Porcentaje del área mundial sembrada
Subcontinente de la India y Asia suroriental	840	16672	35
Africa occidental y Sudán	755	11697	24
Africa oriental y Yemen	917	2970	6
Africa meridional	805	1295	3
América Central y México	2238	1723	5
Promedio	1111	-	-
Total	-	34357	73

FUENTE: FAO, 1982.

El Programa de Sorgo (PS) del instituto es multidisciplinario: está sustentado por cinco científicos en mejoramiento, tres científicos en fisiología, tres en patología y tres en entomología, y un científico en cada una de estas áreas: microbiología, bioquímica y recursos genéticos. Los proyectos de microbiología, bioquímica y recursos genéticos tienen responsabilidades con respecto a todos los cultivos en los cuales el ICRISAT ha recibido un mandato. Los científicos de los programas de sistemas de cultivo y de economía están también activamente involucrados en la investigación del sorgo.

Se piensa que el PS del instituto, además de coordinar todas las actividades regionales, sirva al subcontinente indio y al Asia suroriental. En otros programas colaborativos, se enviaron varios científicos a países del Africa occidental y se espera tener un equipo regional multidisciplinario para esta región en un futuro cercano. El programa regional para el sur de Africa (países de la Conferencia Coordinadora para el Desarrollo de Africa del Sur, SADCC) acaba de recibir sus fondos iniciales y ya se ha contratado el primer científico de sorgo. Un mejorador cuya base es Kenya sirve como coordinador de los ensayos del Comité Consultivo de Asistencia para la Investigación y el Desarrollo de Granos Alimenticios en Suelos Semi-Aridos (SAFGRAD) de sorgo y millo para Africa oriental y Africa meridional.

En América Central, nuestro programa regional consta de dos científicos, un mejorador y un agrónomo, quienes tienen su base en CIMMYT, México, y sirven a la América Central y al Caribe.

A medida que los programas regionales y el PS del Centro se desarrollaban, se diseñaba una estrategia de investigación que identifica cuatro etapas en el mejoramiento del sorgo (Cuadro 4). Para mantener las prioridades del Plan para Diez Años (ICRISAT, 1982) los cinco primeros años de la década de los

Cuadro 4. Etapas en el mejoramiento del sorgo.

Etapa No.	Actividad realizada
1	Identificación de factores que limitan el rendimiento
2	Desarrollo de métodos de selección
3	Desarrollo de productos de la investigación (por ejemplo, variedades e híbridos)
4	Trasferencia de tecnología a los programas nacionales y a los agricultores

80 se dedicaron, en su mayor parte, a establecer y a perfeccionar procedimientos de selección para manejar un gran número de materiales de germoplasma y de líneas del mejorador.

Germoplasma de Sorgo

Antes de continuar con los objetivos específicos de las disciplinas dentro del PS, es muy importante mencionar el germoplasma de sorgo. Es nuestro recurso más valioso y forma el núcleo de todas nuestras actividades de investigación. La Colección Mundial de sorgo mantenida por la Unidad de Recursos de Germoplasma en ICRISAT tiene más o menos 22,000 accesiones procedentes de 70 países (Cuadro 5).

Para hacer la colección más útil a los científicos dedicados al fitomejoramiento, se han llevado a cabo actividades tanto de conversión como de introgresión con algunas accesiones seleccionadas. El plan de conversión se ha desarrollado según el modelo del programa de retrocruce de la Universidad de Texas A y M y del USDA, que introduce genes que contribuyen a la insensibilidad al fotoperíodo y a una menor altura de la planta. El ICRISAT ha participado en un comité reunido por el IBPGR para desarrollar y publicar una lista de descriptores que caractericen el germoplasma de sorgo (IBPGR/ICRISAT, 1980). Toda esta información se ha almacenado en un computador y los usuarios tienen acceso a ella. La lista es muy útil para un programa de fitomejoramiento y es necesario que se distribuya más ampliamente en América Latina. Se espera que los científicos que coleccionan sorgo en América Latina envíen al ICRISAT semilla y datos biológicos para incluir sus hallazgos en la colección mundial. Esta es sin duda un área importante de colaboración. También se agradecería que, a medida que los científicos evalúan y usan estas accesiones, envíen sus resultados a la Unidad de Recursos Genéticos del ICRISAT.

Cuadro 5. Situación de la colección de germoplasma de sorgo en el ICRISAT.

Líneas cultivadas	Parientes silvestres	Países representados	Líneas evaluadas en Patancheru	Líneas distribuidas	Países beneficiarios
22,553	345	79	20,355	214,950	73

Objetivos Específicos

Los objetivos específicos de las disciplinas relacionadas con la reducción de los estreses biótico y abiótico son esencialmente los mismos que se han establecido dentro de las áreas prioritarias de investigación, a saber: desarrollar técnicas que permitan seleccionar un gran número de materiales de germoplasma y de líneas del mejorador, y llevar estas fuentes de resistencia, a través del mejoramiento, hasta los programas nacionales.

Por esta razón, daré ejemplos detallados de nuestros objetivos en sólo una de las tres disciplinas relacionadas, la fisiología. La he escogido por dos razones: es una de las principales disciplinas que nutren esta reunión de trabajo, y además, como fisiólogo, estoy mejor calificado para discutir la investigación de mi propio programa. No obstante, delinearé las áreas de investigación prioritarias en entomología y en patología, y concluiré describiendo cómo estas fuentes de resistencia, identificadas en el germoplasma, se han utilizado en nuestro programa de mejoramiento y diseminado a los programas nacionales de los TSA.

Estrés Abiótico

Los objetivos generales de la investigación sobre el estrés abiótico tienden a ayudar al programa de mejoramiento del sorgo a desarrollar sorgos que sean más estables y tengan mejores rendimientos bajo el estrés ambiental. Desde 1980, y bajo este objetivo amplio, hemos limitado nuestras actividades de investigación a dos áreas prioritarias:

- los factores que afectan el establecimiento del cultivo; y
- la respuesta y adaptación al estrés causado por la temperatura y por la falta de agua y nutrimentos, fenómeno que se conoce ampliamente como sequía en los campos de los agricultores.

Durante este período nuestros objetivos específicos fueron los siguientes:

- Desarrollar técnicas simples, repetibles y baratas capaces de seleccionar grandes cantidades de líneas, tanto genéticas como del fitomejorador, y hacer llegar estas fuentes de resistencia (directa o indirectamente mediante el mejoramiento) a los programas nacionales.

- Asegurar que estas fuentes de resistencia, junto con las fuentes de susceptibilidad, estén plenamente disponibles para los fisiólogos que trabajan fuera del ICRISAT, de modo que la investigación básica importante de estos materiales continúe paralelamente con nuestra selección.
- Entender mejor la base fisiológica de las prácticas de manejo actuales y mejorar, junto con los agrónomos, estos sistemas.
- Capacitar a aquellas personas que están trabajando en los programas nacionales de los TSA en las técnicas de selección y en las prácticas de manejo.

En el área de establecimiento del cultivo se ha desarrollado una serie de técnicas de selección, de las cuales presentamos dos ejemplos; ambos se refieren a la selección por emergencia de las plántulas en suelos cuya superficie tenga altas temperaturas. El primer método, que aplica diferentes tratamientos a la superficie del suelo para modificar su temperatura (Wilson et al., 1982) ha indicado que hay una variación genética en la habilidad del sorgo para emerger de suelos que tengan temperaturas altas, y que algunas líneas emergen aunque la temperatura del suelo llegue a 55 °C.

Se han hecho estudios similares empleando una segunda técnica que consiste en colocar en un tanque de agua materas grandes de arcilla (de 300 mm) llenas de suelo. Las semillas se siembran en las materas y la temperatura se mantiene entre 35 y 50 °C variando la altura de unas lámparas infrarrojas. Las diferencias genotípicas en la emergencia fueron más evidentes a los 45 °C. La ventaja de esta técnica, que no es tan simple como la anterior, es que la selección se puede hacer sin que el agua sea una limitante o sin que se forme costra en el suelo.

Con respecto a la sequía comentaré dos aspectos. El primero es el bien conocido sistema de irrigación de aspersores con fuente y una línea (Hanks et al., 1976) que expone el cultivo a un gradiente de agua en el suelo durante diferentes etapas de su crecimiento. Esta técnica permite analizar un grupo de genotipos bajo un rango continuo de niveles de agua. La Figura 2 muestra las curvas de respuesta típicas de dos líneas contrastantes de sorgo y sirve para ilustrar la necesidad de ajustar variedades e híbridos a ambientes particulares. El tipo 1 (línea continua) claramente se comporta mejor en áreas de precipitación alta pero falla completamente en la zona seca. El tipo 2 (línea discontinua) tiene sin duda un potencial de rendimiento mucho menor pero rendirá algo bajo condiciones de estrés.

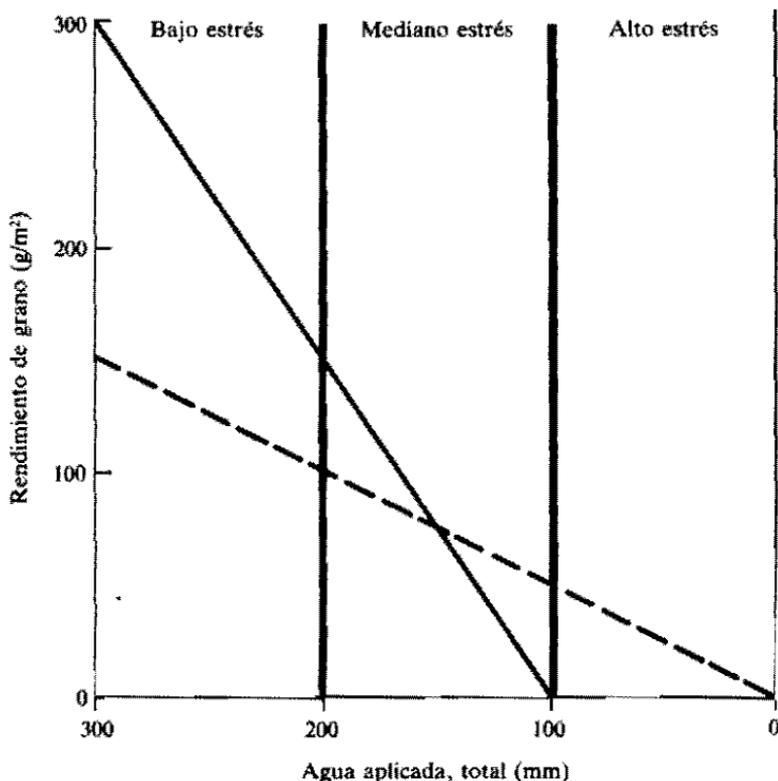


Figura 2. Relación entre el agua aplicada y el rendimiento de grano de dos líneas de sorgo contrastantes.

Otra metodología consiste en coleccionar materiales que provengan de un amplio rango de grupos taxonómicos, de regiones geográficas y de climas, para seleccionarlos según sus características particulares fenológicas, morfológicas y fisiológicas bajo condiciones severas de estrés ambiental. Un ejemplo sería nuestra colección de precipitación pluvial la cual, además de la variabilidad indicada anteriormente, está estratificada en tres zonas pluviométricas, es decir, las que anualmente reciben de 250 a 600 mm, de 600 a 900 mm, y más de 900 mm de lluvia.

Cada colección comprende más o menos 200 líneas y se siembra en la época de verano en Patancheru, India. Se le impone un estrés muy severo 30 días después de la siembra. La temperatura máxima durante el período sin lluvia sobrepasa los 40 °C, y las tasas de evaporación alcanzan 16 mm/día. Un rasgo muy importante que estamos buscando es la habilidad de las hojas en crecimiento para evitar la desecación (Figura 3). En

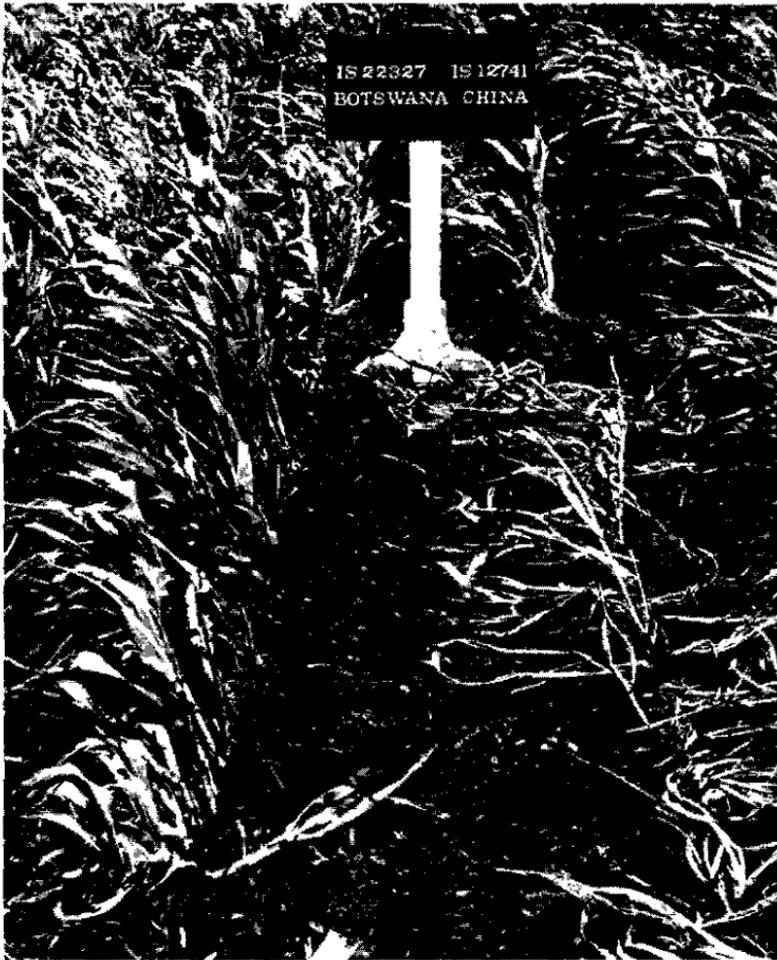


Figura 3. Efecto del calor extremo y de la escasez de agua en algunos cultivares de sorgo sembrados en Patancheru, India. Las hojas de la línea proveniente de China han sufrido desecación severa; en contraste, la línea de Botswana conserva sus hojas verdes.

1983 se seleccionaron varias líneas resistentes y susceptibles y, de acuerdo con nuestro segundo objetivo principal, la semilla de estas líneas se envió a otros fisiólogos que trabajan fuera del ICRISAT, quienes están interesados en los mecanismos implicados en ese carácter.

Un ejemplo de esta investigación colaborativa es el proyecto que se adelanta actualmente en la Estación de Mejoramiento de Plantas de Welsh (WPBS), en el Reino Unido, donde los científicos han hallado que la emergencia a altas temperaturas

está altamente correlacionada con la síntesis de proteína de su embrión (WPBS, 1983). La investigación no sólo condujo al desarrollo de una metodología de selección que servirá para evaluar un gran número de líneas, sino que ha intentado establecer cuáles son los procesos bioquímicos asociados con el establecimiento deficiente de un cultivo.

Los proyectos existentes con organizaciones tales como el Consejo Hindú de Desarrollo Agrícola (ICAR), el Centro Internacional para la Investigación y el Desarrollo (IDRC), INTSORMIL y la Entidad Administrativa para el Desarrollo de Ultramar (ODA) han sido muy efectivos y debemos hacer todo lo posible para alentar nuevos proyectos con ellos y fortalecer los vínculos existentes.

Yo creo que el problema de los suelos ácidos en América Latina se presta mucho para esta metodología, y espero que en el curso de esta semana los científicos y organizaciones interesados en el preparen una estrategia efectiva de investigación para atacar uno de los problemas más serios de la producción de sorgo en América Latina.

Estrés Biótico

Estrés por enfermedades y por *Striga*

Las enfermedades prioritarias de importancia mundial sobre las cuales se ha hecho investigación en el instituto y en algunas localidades de India son:

- Moho del grano (biodeterioración del grano antes de la cosecha) ocasionado por un complejo de hongos.
- Pudriciones de la raíz y el tallo, que generalmente traen como resultado el acame de la planta, ocasionados por *Macrophomina phaseolina* y por *Fusarium* spp. (ICRISAT, 1984b).
- Moho velloso causado por *Peronosclerospora sorghi*.

También se han adelantado investigaciones sobre enfermedades de importancia regional, si ellas también ocurren en la India. Estas son la antracnosis y la roya. El establecimiento de grupos regionales multidisciplinarios facilitará la investigación de enfermedades de importancia local y regional -tales como los virus en América Central, el añublo foliar y la mancha foliar gris en

Africa oriental, la franja de hollín y los carbones en Africa Occidental— para las cuales no hay oportunidades de selección en la India.

Striga es una maleza parasítica que crea un problema serio en la India y en Africa occidental. El PS del instituto trabaja en *S. asiatica* y los científicos del PS destacados en Burkina Faso con *S. hermonthica*. Afortunadamente, *Striga* no ha sido hallada en América Latina. Se pueden solicitar dos boletines informativos de ICRISAT sobre la identificación tanto de las enfermedades del sorgo y del millo como de la maleza *Striga* (Williams et al., 1978; Ramaiah et al., 1983).

Las áreas específicas de investigación son:

- Biología de los patógenos y epidemiología de las enfermedades que ellos causan. Esta información es esencial para el desarrollo de técnicas válidas de selección por resistencia.
- Desarrollo de técnicas de selección por resistencia.
- Identificación de resistencia tanto en el material original como en las progenies de mejoramiento.
- Pruebas en varias localidades de materiales con resistencia identificada en sitios clave, para buscar estabilidad de la resistencia.
- Estudio de la naturaleza de la resistencia y su utilización en proyectos de mejoramiento.

Estrés causado por plagas

Los insectos de importancia global cuyo estudio es prioritario son los barrenadores del tallo, la mosca del cogollo, la mosca del vástago, y las chinches de la panícula. Hay varios perforadores del tallo importantes, tales como *Chilo*, *Sesamia*, *Eldana*, *Busseola* y *Diatrea*. Este último es común en América. En India el 90% del daño que recibe el sorgo lo causa la chinche de la panícula (*Calorcoris angustatus*). ICRISAT publica un boletín de información sobre los insectos del sorgo (Teetes et al., 1983).

Las áreas específicas de investigación son:

- Desarrollar métodos confiables de selección.
- Identificar fuentes de resistencia.

- Incorporar esta resistencia en materiales de características agronómicas buenas.

Mejoramiento por Rendimiento, Estabilidad, Calidad, y Resistencia

El objetivo general del mejoramiento es desarrollar cultivares de altos rendimientos que aumenten y establezcan la producción de sorgo en los TSA. Esto se alcanza seleccionando los materiales de mejores rendimientos y calidad agronómica, e incorporando las características de grano de buena calidad, y la resistencia al estrés tanto biótico como abiótico. Los métodos de mejoramiento convencionales y de poblaciones se usan en el desarrollo de variedades e híbridos.

En el ICRISAT se desarrollaron poblaciones a partir de materiales originarios de las Universidades de Nebraska y Purdue, Estados Unidos; de Serere, Uganda; y de Samaru, Nigeria. En el futuro, esas poblaciones se reunirán en cinco, en las cuales se utilizará un amplio rango de germoplasma y fuentes de resistencia (Cuadro 6).

Algunas variedades de alto rendimiento se han desarrollado (Cuadro 7) y distribuido a los programas nacionales principalmente a través del Vivero de Observación de Progenies Promisorias de Sorgo, el Ensayo Internacional de Adaptación de Variedades de Sorgo, y el Vivero Internacional de Observación de Sorgo en Sequía. Además se han distribuido cientos de líneas del mejorador en diferentes etapas de desarrollo a los mejoradores de los programas nacionales para que prosigan su selección y las incorporen en sus programas.

En el programa de hibridación se seleccionó el material de mejoramiento buscando restauradores potenciales con buena habilidad de combinación. Se usaron líneas seleccionadas para producir híbridos experimentales en progenitores hembras desarrollados por el Proyecto Coordinado en Toda la India para el Mejoramiento del Sorgo (AICSIP). Se han evaluado varios cientos de híbridos experimentales en diferentes localidades de la India, y se han identificado 60 híbridos de alto rendimiento que se distribuyeron al AICSIP y a otros programas nacionales en los TSA. Como se indicó en la introducción, es esencial que los cultivares de sorgo recomendados a los agricultores sean aceptables como alimento. Las áreas prioritarias de investigación son las siguientes:

Cuadro 6. Poblaciones de sorgo planeadas para incorporar en ellas resistencia a factores múltiples (RFM).

Identificación de la población	Origen	Rasgos ^a para incorporar y seleccionar	Rasgos sujetos a monitoría ^c
ICSPI-R/RFM	US/R Rs/R	Mejor rendimiento de grano. ^b Resistencia al moho del grano, al barrenador del tallo, a la mosca del cogollo, y a la mosca del vástago (midge).	Pudrición carbonosa, establecimiento del cultivo, <i>Striga</i> , calidad alimenticia.
ICSP2-B/RFM	US/B Rs/B	Mejor rendimiento de grano. ^b Resistencia al moho del grano, al barrenador del tallo, a la mosca del cogollo, y a la mosca del vástago (midge).	Pudrición carbonosa, establecimiento del cultivo, <i>Striga</i> , calidad alimenticia.
ICSP3-R/RFM	US/R	Mejor rendimiento de grano. ^b Resistencia al moho del grano y a <i>Striga</i> , y mejor establecimiento del cultivo.	Pudrición carbonosa, barrenador del tallo, mosca del cogollo, y mosca del vástago (midge); calidad alimenticia.
ICSP4-B/RFM	US/B	Mejor rendimiento de grano. ^b Resistencia al moho del grano y a <i>Striga</i> , y mejor establecimiento del cultivo.	Pudrición carbonosa, barrenador del tallo, mosca del cogollo, y mosca del vástago (midge); calidad alimenticia.
ICSP5-BR/RFM	WAE	Mejor rendimiento de grano. ^b Resistencia al barrenador del tallo, a la mosca del cogollo, y a <i>Striga</i> ; y alta calidad alimenticia.	Pudrición carbonosa, moho del grano, mosca del vástago, y establecimiento del cultivo.

a. Los rasgos altamente heredables, como la resistencia a las enfermedades mildeo, roya, antracnosis y otras, se fijarán mediante selección masal durante el desarrollo de la población.

b. La evaluación del rendimiento de grano comprendería pruebas bajo manejo óptimo, con baja fertilidad, y en condiciones de escasa humedad.

c. El rasgo establecimiento del cultivo incluye varios componentes: emergencia a través de la costra del suelo, emergencia en un suelo de superficie caliente, vigor de la plántula, y ya sea resistencia de la plántula al estrés por falta de humedad o ya recuperación del estrés por falta de humedad.

Cuadro 7. Variedades o híbridos del ICRISAT liberados o en etapas avanzadas de preliberación, en varios países.

País	Liberados	Preliberación	Pruebas avanzadas
India	1	3	7
Camerún	—	—	2
Burkina Faso	2	—	—
Etiopía	1	—	—
Sudán	1	—	—
República Árabe del Yemen	—	1	1
Zambia	1	—	—
Zimbabwe	—	—	4
El Salvador	2	—	—
Guatemala	—	—	2
México	2	—	—
Nicaragua	—	—	1
Venezuela	1	—	—
China	4	—	—

- Identificar los principales productos alimenticios del sorgo y sus características deseables de calidad.
- Identificar las características del grano que contribuyen a esta calidad alimenticia deseada.
- Desarrollar pruebas fisicoquímicas simples y rápidas, útiles para los mejoradores en sus programas de mejoramiento de calidad.
- Evaluar la calidad alimenticia de los materiales promisorios mejorados (ver ICRISAT, 1982).

Varios híbridos y variedades del PS del ICRISAT están ahora en etapas avanzadas de evaluación, en preliberación o en posliberación, y se siembran ya en los campos de los agricultores en varios países (Cuadro 7).

Producto de esta Investigación y su Impacto

Se están utilizando varias técnicas de selección en los programas nacionales; de interés particular son las siguientes:

- El diseño de campo de tablero de ajedrez (checkerboard) y su análisis estadístico para evaluar la resistencia a *Striga* se usa en el programa nacional de sorgo de India.

- La técnica desarrollada para seleccionar líneas capaces de emerger en suelos cuya temperatura es alta ha sido utilizada exitosamente por científicos de los programas nacionales de Senegal, Mali y Níger.
- La técnica de selección en gran escala en el campo para buscar resistencia al mildiu ha sido adoptada por el programa nacional de India.

El progreso, aunque lento, ha sido muy alentador. En México y en América Central, a pesar del número reducido de científicos dedicados al sorgo, el impacto ha sido impresionante. Esperamos que los participantes de esta reunión trabajen juntos para contribuir a que el mejoramiento del sorgo se disperse más rápidamente hacia otras partes de América Latina.

Resumen

El Instituto Internacional de Investigación en Cultivos para los Trópicos Semiáridos (ICRISAT) tiene su sede principal cerca de Hyderabad, en India. El mandato que ha recibido implica mejorar la estabilidad del rendimiento y la calidad alimenticia de los cultivos sorgo, millo, guandul, garbanzo y maní, y desarrollar sistemas de cultivos que hagan un uso máximo de los recursos y de las limitadas precipitaciones pluviales de la región. La capacitación y la diseminación de información son tareas importantes del instituto.

El rendimiento promedio del sorgo en el mundo en desarrollo es solamente de 1000 kg/ha y en algunas partes del Africa ha descendido hasta 600 kg/ha. El fin último del programa de mejoramiento de sorgo del ICRISAT es producir líneas con rendimientos más altos y estables.

Se han designado cinco regiones como zonas prioritarias, a saber: el subcontinente de la India, Africa oriental, Africa occidental, sur de Africa y América Central junto con México. Este trabajo delinea los problemas prioritarios en estas regiones, describe el objetivo específico de los programas de fisiología, patología, entomología y mejoramiento del sorgo, y hace una relación de las líneas y técnicas que se están utilizando ahora en diferentes países.

Referencias

- CGIAR (Consultative Group for International Agricultural Research). 1980. CGIAR, Secretariado. Washington DC, E.U.
- FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations). 1982. Production yearbook 1981. Roma, Italia. p. 107-108.
- Fischer, K. S. y Wilson, G. L. 1975. Studies of grain production in *Sorghum bicolor* (L.) Moench. V. Effect of planting density on growth and yield. Aust. J. Agric. Res. 26:31-41.
- Hanks, R. J.; Keller, J.; Rasmussen, V. P. y Wilson, D. G. 1976. Line source sprinkler for continuous variable irrigation-crop production studies. Soil Sci. Soc. Am. J. 40:426-429.
- IBPGR (International Board for Plant Genetic Resources) /ICRISAT (International Crops Research Institute for the Semi-Arid Tropics). 1980. Sorghum descriptors. AGP:IBPGR/80/1. IBPGR, Secretariado, Roma, Italia.
- ICRISAT (International Crops Research Institute for the Semi-Arid Tropics). 1982. En: Proceedings of the International Symposium on Sorghum Grain Quality, 1981, ICRISAT. Patancheru, A.P., India.
- . 1982. ICRISAT in the eighties: A 10-year plan. Patancheru, A.P., India. p. 9-14.
- . 1984a. ICRISAT publications catalog 1984. Patancheru, A. P., India.
- . 1984b. Sorghum root and stalk rots: A critical review. En: Proceedings of the Consultative Group Discussion on research needs and strategies for control of sorghum root and stalk rot diseases, Bellagio, Italia, 1983. Patancheru, A.P., India.
- Murdock, G. P. 1959. Staple subsistente crops of Africa. Geogr. Rev. 50:521-540.
- Pickett, R. C. y Fredericks, E. E. 1959. The new look in sorghum. Purdue Univ. Agric. Exp. Stn. 2:5-8. (Reimpresión.)
- Ramaiah, K. V.; Parker, C.; Vasudeva Rao, M. J. y Musselman, L. J. 1983. *Striga* identification and control handbook. Boletín Informativo No. 15. ICRISAT, Patancheru, A.P., India.
- Sivakumar, M. V. K. y Virmani, S. M. 1982. The physical environment. En: Sorghum in the eighties. Proceedings of the International Symposium on Sorghum, ICRISAT, 1981. ICRISAT, Patancheru, A.P., India. p. 83-100.

- SMIC (Sorghum and Millets Information Center). 1984. Sorghum and millets information center. ICRISAT, Patancheru, A.P., India 28 p.
- Teetes, G. L.; Seshu Reddy, K. V.; Leuscher, K. y House, L. R. 1983. Sorghum insect identification handbook. Boletín Informativo No. 12. ICRISAT, Patancheru, A.P., India.
- Williams, R. J.; Frederiksen, R. A. y Girard, J. C. 1978. Sorghum and pearl millet disease identification handbook. Boletín Informativo No. 2. ICRISAT, Patancheru, A.P., India.
- Wilson, G. L.; Raju, P. S. y Peacock, J. M. 1982. Effect of soil temperature on sorghum seedling emergence. Indian J. Agric. Res. 52:848-851.
- WPBS (Welsh Plant Breeding Station). 1983. Study of temperature effects on germination and establishment in sorghum and pearl millet; research scheme R3801. Overseas Development Administration (ODA), Londres, Reino Unido.

El Cultivo del Sorgo en Colombia y sus Posibilidades en los Suelos Ácidos de los Llanos Orientales

*Manuel Torregroza C.**

Introducción

Los siguientes son cinco de los principales factores que han justificado el aumento de la producción de sorgo en Colombia:

- el auge de la industria avícola en el país, que utiliza el grano de sorgo como una de las materias primas básicas en la manufactura de concentrados;
- la excelente adaptación de este cereal a las regiones de clima cálido, comprendidas entre el nivel del mar y los 1200 metros de altitud, donde ni el arroz ni el maíz constituyen una adecuada alternativa agroeconómica;
- el período vegetativo, relativamente corto, de esta especie vegetal, que permite recomendarla como cultivo de rotación;
- el manejo agronómico fácil de este cultivo;
- el menor valor comercial de la tonelada de grano de sorgo, comparado con la del maíz, fenómeno que ha contribuido a sustituir, en la preparación de los concentrados, el segundo cereal por el primero.

El propósito de este artículo es destacar los aspectos fundamentales de la producción de sorgo en Colombia, y presentar un breve informe del comportamiento agronómico de los genotipos de sorgo para grano, tolerantes al exceso de aluminio, que se siembran en los suelos ácidos de los Llanos Orientales.

* Director de la División de Agronomía, Programa de Maíz y Sorgo, ICA, Bogotá, D.E., Colombia.

Evolución del Cultivo e Importaciones

La producción de sorgo para grano comienza a fomentarse en 1957, cuando la empresa Purina Colombiana sembró tres híbridos en la región algodonera de la Costa Atlántica. En 1960 se cosechaban ya 6300 toneladas de grano en 2800 hectáreas, cifras que ascendían en 1970 a 118,000 y 54,000, respectivamente, y llegaron en 1980 a las 431,000 y 206,000, respectivamente. Durante 1983 se obtuvo una producción de 593,000 toneladas en 270,000 hectáreas. Como consecuencia de esta espectacular evolución del cultivo, de los cinco cereales (arroz, cebada, maíz, sorgo y trigo) de mayor consumo, el sorgo ocupa, en la actualidad, el tercer lugar en área sembrada, sólo superado por el arroz y el maíz. En 1983, se sembraron 1,317,000 hectáreas con estos cinco cultivos, que produjeron 3,339,000 toneladas de granos; a estas cifras el sorgo contribuyó con el 21% y el 18%, respectivamente.

Sin embargo, a pesar del enorme desarrollo de este cultivo, la producción del sorgo granífero no ha satisfecho la demanda, en permanente crecimiento, de la industria de concentrados; por consiguiente, fue necesario suplir los déficit mediante las importaciones, iniciadas en 1972. Hasta la fecha, han entrado al país 500,000 toneladas de sorgo para grano, de las cuales 51,000 llegaron en 1983.

Las Regiones Productoras de Sorgo

El cultivo del sorgo para grano se ha localizado en cuatro grandes regiones agrícolas de Colombia: la costa atlántica, la zona central, el valle geográfico del río Cauca, y los Llanos Orientales. Al promediar el área sembrada durante el período 1980-1983, se encontró que en la primera región se sembró el 37% del sorgo, en la segunda el 30%, en la tercera el 22%, y el 11% restante en los Llanos Orientales. Por su corto período vegetativo y el régimen de lluvias existente en esas regiones, es posible sembrar dos cosechas de sorgo en un año agrícola. Sin embargo, por la distribución de las lluvias, que permite hacer la cosecha en el período seco cuando es menor el ataque de plagas y enfermedades, se recomienda sembrar este cultivo una vez al año en los Llanos Orientales, es decir, en el segundo semestre. Las 20,000 hectáreas de sorgo que, en promedio, se siembran anualmente en esa región del país son parte de las 160,000 hectáreas

de suelos de clase I que hay en ella, caracterizados por su buena fertilidad, su textura variable, su buen drenaje, y el escaso riesgo de inundaciones. Además del sorgo, en estos suelos se siembra maíz, arroz de secano, algodón, maní, ajonjolí, yuca, plátano y palma africana, entre otros cultivos anuales y perennes. Las variedades y los híbridos de sorgo rinden allí entre 2 y 4.5 toneladas por hectárea. Según Sánchez y Owen (1983), estos suelos contienen, en promedio, alrededor de 0.72 meq Al/100 g; por tanto, es posible sembrar en ellos cultivos susceptibles a la toxicidad de este elemento químico si se les aplican bajas cantidades de correctivos.

Principales Características de los Suelos de Clase IV de los Llanos Orientales

Los Llanos Orientales, por su enorme extensión, su ubicación geográfica, su fácil mecanización y sus condiciones climáticas relativamente bien definidas, constituyen una región privilegiada, de la cual se espera un intenso y próspero desarrollo agropecuario. La fertilidad de sus suelos, restringida especialmente por la excesiva cantidad de aluminio intercambiable, es el factor edáfico que ha impedido la incorporación de esta región a la economía del país.

Del total de 17 a 19 millones de hectáreas de sabana que cubren los Llanos Orientales, la FAO ha clasificado los suelos de 12,936,621 hectáreas en ocho clases, según su potencial para el uso y manejo agrícolas. De esa área, el 27% (las clases I a IV) está considerada como región de gran vocación agrícola. De este porcentaje, aproximadamente 2 millones de hectáreas han sido catalogados en la clase IV, y se distinguen por su baja fertilidad y abundante cantidad de aluminio intercambiable (Sánchez y Owen, 1983).

Según los datos del Cuadro 1, estos suelos se caracterizan por su extrema acidez: de 343 muestras estudiadas, el 86% presentó un pH que variaba entre menos de 4.5 y 5.5, con un promedio de 4.6. Es probable que los valores superiores a 5.5 fueran muestras provenientes de lotes previamente encalados. Esta clase de suelos contiene altos niveles de Al intercambiable. En el 81% de las muestras analizadas se encontró que ese elemento fue superior a 1.00 meq/100 g de suelo, y que el promedio de las muestras llegó a 2.56 meq/100 g. En general, los suelos de

Cuadro 1. Estado de siete componentes químicos y de dos características de los suelos de la clase IV en los Llanos Orientales, Colombia.*

Muestras, por rangos	pH	%	Al ⁺⁺⁺ (meq/100 g)	%	M.O. (%)	%	P, Bray II (ppm)	%	K ⁺ (meq/100 g)	%	Ca ⁺⁺ (meq/100 g)	%	Mg ⁺⁺ (meq/100 g)	%
Rango 1	<4.5	36	>2.0	45	<1.9	24	<4.9	53	<0.04	23	<1.0	60	<0.50	81
Rango 2	4.6-5.5	50	1.9-1.0	36	1.9-4.0	53	4.9-10.0	24	0.04-0.10	36	1.1-2.0	23	0.51-1.00	14
Rango 3	5.6-6.5	12	0.9-0.5	17	>4.0	23	10.1-15.0	9	0.11-0.15	21	2.1-5.0	11	1.01-1.50	2
Rango 4	>6.5	2	<0.4	2			15.1-30.0	8	0.16-0.30	16	>5.0	6	>1.50	3
							>30.0	6	>0.30	4				
Promedio	4.6		2.56		3.39		5.0		0.09		0.80		0.37	
Muestras analizadas, n	343		343		343		343		135		86		81	

a. Los porcentajes a la derecha de cada columna indican la proporción en que se hallan las muestras en cada rango estudiado. M.O. = materia orgánica.

FUENTE: Sánchez y Owen, 1983.

la clase IV contienen una adecuada cantidad de materia orgánica; su promedio es de 3.39%, y el 76% de las muestras tomadas en ellos contenían más de 1.9% de materia orgánica.

Respecto al fósforo, el 53% de las 343 muestras tomadas contenía menos de 5 ppm. Por tanto, la deficiencia de este nutrimento y la toxicidad del aluminio son las principales limitaciones del establecimiento de cultivos en los suelos de la clase IV. El potasio representa también otra limitación, puesto que el 59% de las muestras contenían menos de 0.10 meq/100 g de suelo, para un promedio de 0.09. En estos suelos, además, los niveles de calcio y de magnesio son bastante bajos; el 83% de las 86 muestras estudiadas contenían menos de 2.00 meq de Ca/100 g, y su promedio fue de 0.80. Finalmente, de las 81 muestras analizadas el 95% no contenía más de 1.00 meq de Mg/100 g de suelo, para un promedio de 0.37.

Sede de la Actividad Investigativa

Las investigaciones dirigidas a seleccionar genotipos mejorados de sorgo para grano comenzaron en el programa de Maíz y Sorgo del Instituto Colombiano Agropecuario (ICA) el segundo semestre de 1983, en el Centro Regional de Investigación (CRI) La Libertad, localizado en el municipio de Villavicencio, departamento de Meta, a 140 kilómetros, aproximadamente, al este de Bogotá. Los principales datos meteorológicos y la ubicación de este Centro aparecen en el Cuadro 2. En el área caen 2614 mm de precipitación anual, usualmente entre abril y noviembre.

Cuadro 2. Ubicación del Centro Regional de Investigación La Libertad y sus principales datos meteorológicos.

Municipio	Villavicencio
Departamento	Meta
Latitud	4° 03' N
Longitud	73° 29' O
Altitud	336 msnm
Temperatura, promedio anual	26 °C
Precipitación anual	2614 mm
Humedad relativa	77%
Evaporación mensual	134 mm
Brillo solar diario	5 horas

En el lote de La Libertad donde se hacen las siembras experimentales, se analizaron 60 muestras respecto a ocho características del suelo; el resultado es el siguiente:

pH	4.43
M.O. (%)	3.75
Aluminio (meq/100 g)	3.99
Potasio (meq/100 g)	0.11
Calcio (meq/100 g)	0.59
Magnesio (meq/100 g)	0.26
Sodio (meq/100 g)	0.37
Fósforo (ppm)	8.14

Puesto que el objetivo del proyecto es conocer la adaptación y la tolerancia a suelos ácidos de algunos genotipos, a este lote se le aplicaron las siguientes enmiendas (en kg/ha): cal dolomítica, 500; N, 100; P₂O₅, 75; y K₂O, 45.

Resultados y Discusión

Para incorporar los suelos de clase IV de los Llanos Orientales a la producción agrícola del país, se adoptó inicialmente la hipótesis de que era preciso cambiar las características químicas de esos suelos para que pudiesen satisfacerse las necesidades nutricionales indispensables de las plantas. El Programa de Suelos del ICA realizó este tipo de investigación en la década del 60, y evaluó diversos genotipos de arroz, ajonjolí, frijol, caupí, maní, maíz, sorgo, soya y yuca, entre otros cultivos. Los resultados no fueron halagadores, como se esperaba. Sin embargo, se encontró que había especies vegetales más tolerantes que otras a los suelos ácidos, tales como maní, caupí, tabaco, yuca y palma africana.

Spain (1976) describió las investigaciones que el CIAT realiza en el CNI Carimagua del ICA para identificar genotipos tolerantes a suelos ácidos; observó que el arroz, la yuca y muchas especies forrajeras se consideraban cultivos de un amplio rango de tolerancia, muy tolerantes, y bien adaptados, respectivamente, a los suelos ácidos. En una de sus recomendaciones señala que la efectiva explotación de la variación genética en tolerancia a esta clase de suelos requiere la formación de un equipo multidisciplinario integrado por especialistas en fitomejoramiento, en suelos y en fisiología vegetal. Sánchez y Owen (1983), basados en experimentos hechos en los suelos de los Llanos Orientales

—incluyendo los de clase IV— hacen una serie de recomendaciones sobre la factibilidad económica de los fertilizantes usados y del manejo dado a los principales cultivos anuales en esa región del país.

La alternativa de resolver la desadaptación de los cultivos a los suelos ácidos mediante el mejoramiento del medio en el cual éstos crecen y se desarrollan no dio los resultados esperados; por consiguiente, se explora actualmente otra solución: el manipuleo genético y la selección de materiales resistentes o tolerantes a la toxicidad causada por algunos elementos del suelo. Se trabaja ahora en estrecha colaboración con INTSORMIL, entidad internacional que investiga esta clase de genotipos del sorgo.

La primera siembra se hizo en el segundo semestre de 1983 (1983B) en el CRI La Libertad, y se ensayaron 1400 líneas. De este material, en que se hizo selección entre las líneas y dentro de ellas, se escogieron 150 líneas y 300 panojas, respectivamente. Para acelerar el proceso de selección y adaptación, las 590 selecciones hechas en 1983B se sembraron en 1984A (primer semestre) junto con 600 introducciones más procedentes del INTSORMIL. Se hicieron ensayos de rendimiento con las mejores líneas de la selección anterior. En el Cuadro 3 se indican los rangos y los promedios de tres características agronómicas de las 90 mejores líneas sembradas en 1983B. En el Cuadro 4 aparecen las doce líneas que tienen mayor peso del grano por planta, de entre las 90 mencionadas en el Cuadro 3. El rendimiento de los genotipos no. 1, 2, 3, 4 y 5 fue superior a 30 g/planta, y los dos primeros, con más de 50 g/planta, fueron sobresalientes. Se espera que este material promisorio, así como otros genotipos de INTSORMIL, se conviertan en el punto de partida de futuras selecciones y evaluaciones, y de aumento de semillas, tanto en La Libertad como en las pruebas regionales hechas en fincas de agricultores. En estos ensayos, hechos en suelos de clase IV, se hallará muy pronto en Colombia la primera variedad mejorada de sorgo que tolere los suelos ácidos.

Cuadro 3. Rango y promedio de tres caracteres agronómicos de 90 genotipos de sorgo, seleccionados en suelos de terraza del CRI La Libertad, en 1983B.

Característica	Rango	Componentes del rango	Promedio
Peso del grano por planta (g)	7.3-56.3	49	16.1
Tiempo hasta la floración (días)	53.0-70.0	17	58.6
Altura de la planta (cm)	83.0-196.0	113	124.2

Cuadro 4. Comportamiento de tres caracteres agronómicos de los doce mejores genotipos de sorgo, seleccionados en suelos de terrazas del CRI La Libertad, 1983B.

No.	Genealogía	Tiempo hasta floración (días)	Altura de planta (cm)	Peso del grano por planta (g)
1.	(SEPON 79-35 x IS 7542C)-5	63	116	56.3
2.	(IS 7542C x SEPON 79-2)-6	68	132	56.0
3.	(IS 7542C x SEPON 79-2)-2	69	96	37.2
4.	(NB 9040 x IS 7173C)-140-3	57	106	32.8
5.	(SEPON 79-29 x IS 7542C)-8	59	137	30.5
6.	(IS 7542C x SEPON 79-2)-9	58	150	27.0
7.	(SEPON 79-1 x IS 7173C)-13	58	157	26.0
8.	(SEPON 79-35 x IS 7542C)-19	61	130	25.9
9.	(SEPON 79-54 x IS 7173C)-6	60	122	25.7
10.	(SEPON 79-20 x IS 7173C)-10	57	155	25.7
11.	(SEPON 79-54 x IS 7173C)-25	58	130	25.6
12.	(IS 7542C x SEPON 79-20)-4	57	163	24.7
	Promedio	60	133	32.8

Resumen y Conclusiones

La necesidad del autoabastecimiento de la principal materia prima de la industria de los concentrados para animales –en especial, para la avicultura– obliga a buscar alternativas que alejen la frontera agrícola del sorgo y eliminen simultáneamente la carga que representan las importaciones de ese cereal. Los suelos ácidos de clase IV de los Llanos Orientales de Colombia, cuya extensión es de casi dos millones de hectáreas, estarían disponibles para la expansión del cultivo del sorgo. Por tal razón, el Programa de Maíz y Sorgo del ICA, en colaboración con INTSORMIL, inició en 1983B en el CRI La Libertad un proyecto para seleccionar y evaluar genotipos de sorgo tolerantes al exceso de aluminio en el suelo. Los resultados preliminares han sido tan promisorios que se espera registrar próximamente la primera variedad mejorada de sorgo que se adapta a los suelos ácidos de los Llanos Orientales.

Referencias

- Sánchez, L. F. y Owen, E. B. 1983. Fertilización de cultivos anuales en los Llanos Orientales. Manual de Asistencia Técnica 27. Instituto Colombiano Agropecuario (ICA), Bogotá, Colombia. p. 1-45.
- Spain, J. M. 1976. Field studies on tolerance of plant species and cultivars to soil conditions. En: Wright, M. J. (ed.). Plant adaptation to mineral stress in problem soils. Cornell University, Agricultural Experiment Station, Ithaca, NY, E.U. p. 213-222.

SUELOS TROPICALES

Suelos Tropicales: Clasificación y Características

S. W. Buol*

Introducción

En 1950 C.E. Kellog predijo que, a medida que aparecieran mapas más detallados, la variedad en los tipos de suelos encontrados en los trópicos sería mayor que en los de otras partes del mundo. Moorman (1972) atribuyó la falta de apreciación de la variabilidad del suelo en los trópicos en que incurren los agrónomos y otros científicos, a los mapas de suelos en pequeña escala, muy generalizados, por los cuales ellos se guiaban. Buol y Sánchez (1978) fueron aún más firmes en su apreciación, estableciendo que “la realidad de la variabilidad del suelo había sido enmascarada por los ensayos de reconocimiento de suelos en pequeña escala que daban un falso sentido de uniformidad, y servían únicamente para ampliar la brecha entre los científicos, quienes sobreinterpretaban estos mapas, y los agricultores, quienes sabían cómo era el suelo que trabajaban”.

La realidad del trabajo en los trópicos, independientemente de qué tan conscientes seamos de la variabilidad del suelo, es que los sitios de investigación son escasos y el establecimiento detallado de las características del suelo es igualmente escaso. Para compensar por la falta de datos de caracterización, los investigadores agrícolas tienen que asumir una responsabilidad mayor en la caracterización de los sitios en donde trabajan para que puedan aumentar la validez de la transferencia de tecnología. Todo estudio agronómico, ya sea de campo, de invernadero o de laboratorio, que no identifique cuantitativamente el suelo en los estudios de campo, o el material edáfico en los estudios en invernaderos y laboratorios, limita severamente el valor de los datos generados. Liberarse de esta responsabilidad mencionando el nombre de un lugar geográfico, como un país o una

* Profesor de edafología, Universidad Estatal de Carolina del Norte, NC, E.U.

región de un país, o el nombre de una unidad de un mapa de suelos, o incluso un orden taxonómico de suelos, implica un falso sentido de cuantificación que frecuentemente hace más mal que bien.

Los objetivos de este trabajo son:

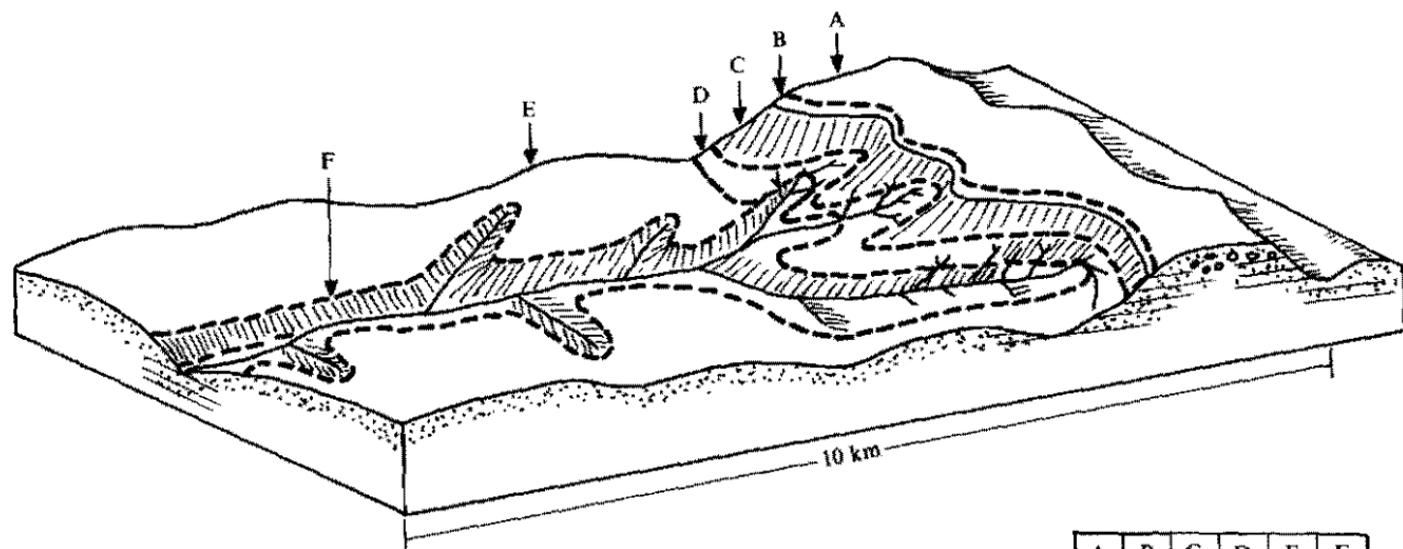
- señalar alguna variabilidad agronómica importante conocida dentro de los suelos, y entre ellos, en las áreas tropicales; y
- sugerir algunas medidas mínimas que se puedan adoptar para mejorar la identificación y caracterización de un sitio y, por ello, el valor de la investigación respecto a otras localidades.

Ningún parámetro único, tal como la caracterización de un suelo, cuantifica totalmente las variables incontrolables de un experimento agronómico, pero cuanto más ajustadamente se definan estas variables, más cerca estaremos de entender, evaluar, y extrapolar los resultados.

Unidades del Mapa

La clasificación de suelos, tal vez más que otras disciplinas, confunde a mucha gente cuyo primer contacto con esa clasificación se hace en un mapa de suelos. El 'mapeo' es la representación de lo que ocurre naturalmente en un área, en una escala muy reducida, y no representa una unidad de clasificación de suelos. Desafortunadamente, en la edafología, así como en otras disciplinas, los nombres taxonómicos se utilizan para nombrar las unidades de los mapas de suelos. Mucha gente parece perder de vista este hecho obvio e intenta nombrar el suelo en que trabaja con el nombre dado en un mapa de suelos, el cual puede estar en una escala tan pequeña que permita incluir varios cientos de hectáreas de suelos muy contrastantes. El sitio de muestreo puede ser menor de 10 cm de diámetro o el lote experimental mucho más pequeño que una hectárea, y ningún mapa, excepto aquellos hechos bajo condiciones muy controladas y a escalas mayores de 1:10,000, podría identificar confiablemente un área tan pequeña (Buol et al., 1980).

Cualquier unidad de un mapa de suelos contiene tipos de suelos no identificados por el nombre dado a esa unidad en el mapa. Un ejemplo de la variabilidad del suelo en un área generalmente identificada en los mapas de suelos como Oxisol se presenta en la Figura 1. Hay mapas detallados para identificar



	A	B	C	D	E	F
Bases (meq/100 g de suelo)	0.6	1.6	5.1	1.4	0.3	0.8
Al intercambiable (meq/100 g de suelo)	0.9	0.1	0.0	0.1	1.3	0.7
Arcilla (%)	18	11	10	6	12	10
Carbón (%)	0.6	0.6	1.0	0.6	0.6	0.5

Figura 1. Valores promedio de propiedades importantes del suelo que se estudian en los horizontes 0-20, en unidades detalladas de un mapa de suelos de una zona dominada por un Oxisol en São Paulo, Brasil.

Oxisoles, Ultisoles, Inceptisoles, Alfisoles y Molisoles, y los valores promedio de ciertas propiedades de la superficie del suelo tomados de unidades cartográficas delineadas en mapas muy detallados, ilustran claramente el contraste agronómico.

Unidades Taxonómicas

Mientras que las limitaciones de la unidad cartográfica las entiende fácilmente la mayoría de los científicos, los rangos de las características definidas en las unidades taxonómicas del suelo no son, en mi experiencia, tan fácilmente entendidas o aceptadas. Aunque usaré ejemplos tomados de la Taxonomía de Suelos (Equipo de Investigación de Suelos, 1975), los mismos problemas existen en otros sistemas, y aún en mayor grado, porque en éstos las definiciones son menos rígidas y el número de categorías y clases es menor. Para entender las dificultades inherentes a la clasificación de los suelos, es preciso comprender que en ningún lugar se puede ver, muestrear o describir un taxón completo, sea éste una serie o un orden de suelos. Los suelos individuales definidos por cada categoría de un sistema de clasificación existen *in toto* solamente como abstracciones definidas por las palabras y las frases del sistema de clasificación. Los *ejemplos* de las diferentes clases de suelo se observan y caracterizan en sitios específicos. A menudo, las personas se forman conceptos bastante firmes de las características de ejemplos específicos y suponen falsamente que todos los sitios clasificados bajo ese nombre tienen *todas* las propiedades que observaron en los ejemplos ya conocidos. Esto es lo mismo, por ejemplo, que tomar a una persona y llevarla a un campo maduro de sorgo para que pueda observar las características morfológicas de las plantas. En otro sitio, tal vez deficiente en nutrimentos, infestado de malezas o dañado por los insectos, cualquier otro cultivar de sorgo que esa persona vea le puede parecer que no sea sorgo. Puesto que los ejemplos individuales de suelos están separados con frecuencia por grandes distancias, y la oportunidad de examinarlos está muy limitada por la necesidad de hacer estas observaciones completas de los suelos en calicatas o cortes de carreteras, la dificultad aumenta mucho.

El Cuadro 1 ilustra brevemente algunas de las propiedades atribuidas al rango de suelos llamado adecuadamente Oxisoles, uno de los diez órdenes de suelos comunes en las áreas tropicales. Esencialmente, las únicas propiedades del suelo identificadas

Cuadro 1. Sinopsis de las propiedades de los Oxisoles.

División	Algunos de los principales criterios para definir las clases
Orden Oxisol	CIC menor de 16 meq/100 g de arcilla en un espesor de 30 cm en los primeros 2 m de la superficie, y sólo trazas de minerales intemperizables en el limo y la arena.
Subórdenes de Oxisoles	Regímenes de humedad en el suelo: Perúdicico, Udico, Ustico, Acuico o Arídico (esto significa que los Oxisoles están presentes en todos los regímenes lluviosos de los trópicos).
Grandes grupos de Oxisoles	<p>"Acr" = CIC efectiva menor de 1.5 meq/100 g de arcilla.</p> <p>"Eutr" = Saturación de bases mayor de 35%.</p> <p>"Hapl" = Saturación de bases menor de 35%.</p> <p>"Umbr" = Contenido de materia orgánica de la superficie mayor de 1%, pero probablemente menor de 20%.</p> <p>"Plinth" = Plintita continua en los primeros 30 cm de la superficie.</p>
Subgrupos de Oxisoles	<p>"Quartzipsamméntico": 15% a 20% de arcilla por encima de 1.25 m.</p> <p>"Epiácuico": color amarillo sobre un subsuelo más rojizo.</p> <p>"Ultico": 40% más de arcilla (proporción relativa) en el subsuelo que en la superficie.</p>
Familias	<p>"Arcilloso": más de 35% de arcilla.</p> <p>"Franco fino": 18% a 35% de arcilla.</p> <p>"Ferrítico": más de 40% de Fe_2O_3.</p> <p>"Caolínico": más de 50% de caolinita (arcilla de caolín).</p>

por el orden llamado Oxisol son los bajos valores del coeficiente de intercambio catiónico (CIC), la falta de minerales meteorizables, y la exclusión de suelos con menos de 15% de arcillas u horizontes arcillosos en el subsuelo. No hay ningún límite relativo a la temperatura del suelo o a los regímenes de humedad; por tanto, los Oxisoles están presentes en las regiones áridas tanto como en las más húmedas de los trópicos. La temperatura media anual puede variar desde la más cálida conocida hasta un límite inferior sin definir, aunque no se ha registrado ningún tipo de Oxisol en regiones donde la temperatura promedio anual es inferior a 8 °C. Tampoco existen límites en el orden Oxisol para el valor del pH o el grado de saturación de bases. Tal vez

la mayoría de los Oxisoles son ácidos y tienen una baja saturación de bases, aunque en los grandes grupos 'Eutr' esa saturación es de 35% a 100% (Cuadro 2). El punto crítico que se debe recordar es que el nombre de una clasificación define únicamente aquellas propiedades del suelo utilizadas como criterio para definir esa clase.

Invariablemente, estos límites son mucho menos estrechos que el concepto que una persona adquiere de ese suelo mediante su experiencia personal en uno o en varios sitios. Además, es muy probable que no haya dos personas que tengan la misma impresión personal de un tipo de suelo a menos que la experiencia de ambas sea totalmente paralela. A modo de ejemplo, no es más diferente la percepción que de una vaca pueda tener una persona de India comparada con esa percepción en una persona de Holanda, o sea, un animal Brahman comparado con uno Holstein-Friesian.

Cuadro 2. Ejemplos de perfiles contrastantes de Oxisoles.

Eutrothox Tropéptico (Puerto Rico)				Acrustox Típico (Puerto Rico)			
Profundidad (cm)	Arcillas (%)	Sat. bases ^a (%)	pH (1:1 H ₂ O)	Profundidad (cm)	Arcillas (%)	Sat. bases ^a (%)	pH (1:1 H ₂ O)
0-20	73.1	72	5.6	0-28	54.4	11	5.1
21-46	81.2	68	5.4	28-46	57.7	1	5.0
47-69	85.5	83	5.9	46-71	59.6	—	5.0
70-99	89.5	83	5.6	71-96	55.7	—	5.2
100-130	90.6	89	5.7	97-120	59.7	2	5.5

a. Saturación de bases por el método de pH 7.

FUENTE: Soil Survey Staff, 1975.

Dinámica del Suelo

El suelo es una entidad; es único por su posición en la interfase entre los mundos orgánico e inorgánico, y está compuesto de sólidos, líquidos y gases. Las características de un suelo son muy dinámicas, y fácilmente modificables por el ambiente y la vegetación. Afectan también al suelo las decisiones del hombre cuando corta, quema, siembra y cosecha las plantas, y cuando fertiliza, seca, riega y manipula físicamente el suelo.

Algunos de los aspectos dinámicos del suelo tenidos en cuenta cuando se caracterizan los suelos de los trópicos quedan ilustrados por los cambios que ocurren en el suelo después de limpiar

un bosque húmedo tropical. Los datos recogidos por Sánchez y Salinas (1981) indicaban consistentemente aumentos en el valor del pH y en los contenidos de Ca, Mg, P y K disponibles en la capa superior después de la quema, y una reducción recíproca del contenido de aluminio intercambiable. Durante un año o más después de iniciar el cultivo, el contenido de materia orgánica disminuía liberando activamente los nutrientes ligados orgánicamente. El contenido de materia orgánica se estabiliza después en un nivel que refleja el nuevo ambiente y, puesto que la materia orgánica no se descompone rápidamente, se liberaron pocos nutrientes para el crecimiento de las plantas. Aunque los sitios diferían notoriamente, el patrón es claro. La interpretación de los datos disponibles, considerada de alta significación, es que no se debería hacer ningún tipo de conclusiones sobre los requerimientos de fertilización o sobre las propiedades del suelo que se funden en datos de campo obtenidos durante los primeros dos años después de una limpieza del área. Se cometen errores similares si se toma suelo y se lo lleva al invernadero. Ciertamente, la composición química del suelo, y probablemente la física o microbiológica, mientras absorbe el impacto de cambiar de una vegetación boscosa a la de un sitio cultivado, es considerablemente diferente tanto de lo que era antes de la limpieza del terreno como del carácter que adquiere el suelo después de que se ha establecido en él un sistema de cultivo continuo o rotacional. Las técnicas de manejo que son adecuadas durante los primeros dos años después de la limpieza no servirán, sin duda, para identificar los problemas de nutrientes del suelo y los problemas de enfermedades y malezas que aparecen después de que el sistema del suelo se ha estabilizado en el nuevo ambiente.

De igual importancia, cuando se evalúa la tecnología de cultivos en diferentes tipos de suelos, son los cambios ocasionados al suelo por las prácticas de manejo de años anteriores. Este efecto es, con frecuencia, de gran importancia en los ensayos hechos en estaciones experimentales. Los efectos residuales de la cal en la capa superior de los Oxisoles están ilustrados claramente en el Cuadro 3. No todos los efectos residuales actúan en la capa superior pues se ha registrado un mejoramiento notable del subsuelo después de varios años de cultivo continuo, de aplicaciones de cal, y de fertilización (Sánchez et al., 1983).

Es evidente, que las propiedades del suelo, especialmente las de la capa superior que están directamente vinculadas con el

Cuadro 3. Efecto de las tasas de aplicación de cal a los 6 y a los 66 meses (ms.) después de su aplicación en la capa superior de un Oxisol cultivado anualmente.

Aplicación de cal (t/ha)	pH (1:1 H ₂ O)		Saturación de Al (%)		Ca + Mg intercambiables (meq/100 g)	
	6 ms.	66 ms.	6 ms.	66 ms.	6 ms.	66 ms.
0	4.7	3.9	63	80	0.6	0.3
1	5.0	4.2	45	61	1.1	0.6
2	5.1	4.3	25	46	1.5	1.0
4	5.6	4.8	6	15	3.1	2.1
8	6.3	5.2	2	2	4.4	4.0

FUENTE: Sánchez y Salinas, 1981.

crecimiento de los cultivos, queden alteradas significativamente por la manipulación de la cubierta vegetal y por la aplicación de fertilizantes y cal.

Clasificación del Suelo

Teniendo en cuenta la dinámica de las propiedades del suelo, que no difiere mucho de la dinámica de las plantas y los animales, ¿cómo clasifica un edafólogo el objeto de su estudio? Simplemente, aplica criterios mensurables que cambian muy poco con las técnicas esperadas de manejo de suelos. La clasificación de suelos evitará emplear características del suelo causadas por el arado; si se usaran, el resultado serían unidades cartográficas que reflejan suelos cultivados con maíz o suelos de bosque. Aunque un corte de un suelo como éste sería muy fácil de ver y medir, no ayuda en nada a predecir qué clase de respuesta se puede esperar cuando se tumba el bosque y el área abierta se siembra con maíz. De la misma manera, no ayudaría a predecir qué calidad del medio se esperaría si el campo de maíz se sembrara con árboles. Por ello, un sistema de clasificación de suelos basado únicamente en las propiedades de importancia agronómica, como son las cantidades intercambiables o disponibles de nutrimentos en la capa superior, no tendría valor para evaluar el potencial de un suelo virgen sino sólo para reflejar el manejo acumulado del pasado.

Este escenario en apariencia negativo se puede resolver muy bien combinando dos cosas: una clasificación que identifique eficientemente las propiedades del suelo que no cambian fácilmente

con las prácticas de manejo esperadas, y una caracterización de los nutrimentos disponibles y de los estados de pH de un 'lote testigo' al comienzo de cualquier experimento de campo. Esta situación de los nutrimentos disponibles debe incluirse también en la publicación de los resultados del experimento.

Heterogeneidad de las Cenizas Volcánicas (Andepts)

Los suelos desarrollados en cenizas volcánicas son comunes en algunas áreas tropicales y están asociados generalmente con una fijación alta de los fosfatos. Hay ejemplos sobresalientes de la alta fijación de fósforo que ocurre en suelos de cenizas volcánicas pero muy pocos de estos suelos causarán problemas de fijación. La distribución de estos suelos con propiedades de alta fijación de fósforo es identificable en patrones locales, pero dado que los factores que conducen a la aparición de este problema están estrechamente relacionados con la edad y la naturaleza de los materiales arrojados por los volcanes, la distribución espacial de esos suelos es generalmente muy heterogénea. La Figura 2 contiene datos tomados de muestras de suelos volcánicos de Chile, Ecuador, Guatemala y Costa Rica que indican la relación entre el oxalato de amonio, el contenido de aluminio extractable, y los porcentajes de retención de fósforo. Es claro que no todos los Andepts son similares pero la retención de fósforo se puede predecir mediante el oxalato del Al extractable. Alvarado (1982) demostró que una prueba de campo de 10 minutos en que se emplean NaF y un indicador de timolftaleína predecirán suelos con alta retención de P. Se debe tener cuidado de ajustar hasta 8.2 el pH de la solución 1 M de NaF. Los cambios de color de la timolftaleína por encima de un pH de 10.7 indican un suelo cuya retención de fósforo está por encima de un 90%. Alvarado y este autor revisaron, empleando este método, muchos de los sitios considerados en Chile y Ecuador, con resultados muy satisfactorios. Cualquiera de los métodos de caracterización de sitios de campo, ya sea el oxalato de aluminio, el NaF, o el método de retención de P, se proponen seriamente como intentos futuros de investigación para evaluar métodos de fertilización fosfórica en suelos de ceniza volcánica.

Se debería recordar también que, usualmente, la retención del P no está muy bien correlacionada con el oxalato de aluminio o con el valor del pH en el NaF, en casi todos los otros suelos. Juo y Fox (1977) indicaron que había alguna variación respecto

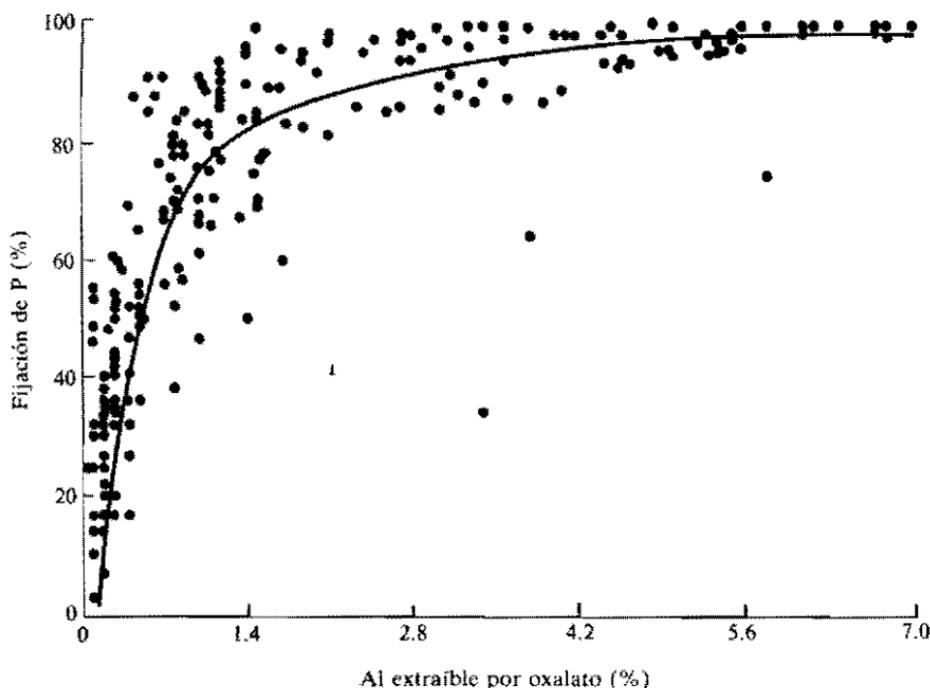


Figura 2. Porcentaje de retención de fósforo en función del porcentaje de oxalato de aluminio extraíble en suelos Andepts de Ecuador, Chile, Costa Rica y Guatemala.

FUENTES: USDA-Soil Conservation Service, 1984; Alvarado, 1982.

al material parental de la muestra pero que la coherencia con el análisis BET-N₂ del área exterior de la muestra¹ era total. Puesto que el área superficial está muy relacionada con la cantidad de arcilla, se puede hacer una predicción razonable de la retención de P (Pope, 1976) partiendo de datos del análisis de tamaño de las partículas (Figura 3). Los intentos de utilizar los datos de área exterior por el método BET-N₂ o el tamaño de las partículas en suelos de ceniza volcánica (Andepts) no han tenido ningún resultado positivo (Alvarado, 1982). Es claro que en Oxisoles, Ultisoles y Alfisoles la fijación del P es superable con aplicaciones iniciales, cuyos efectos residuales son razonables. Donde el aluminio amorfo está presente —como ocurre en algunos, si no en todos, los suelos de cenizas volcánicas (Andepts)— cada adición de fosfatos inicia una reacción que libera más aluminio, de modo que los efectos residuales son mucho menores (Veith y Sposito, 1977). Por consiguiente, no hay un efecto residual en la fertilización con fósforo cuando el factor de fijación es un componente de aluminio amorfo en el suelo.

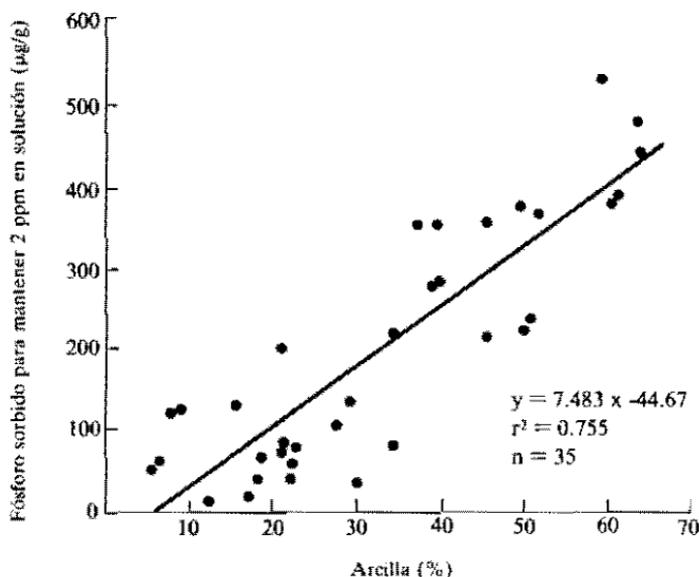


Figura 3. Relación entre la sorción de P a 0.2 mg/kg de P en solución y el porcentaje de arcilla, en sistemas dominados por caolinitas.

FUENTE: Pope, 1976.

Condiciones de los Suelos Ácidos en los Trópicos

La evaluación de los datos existentes y los mapas en pequeña escala estiman que el 43% de las áreas tropicales están dominadas por Ultisoles y Oxisoles; estos son, en general, suelos ácidos. En la América tropical, el área relativa de los suelos ácidos ha sido estimada en un 70% (Sánchez y Salinas, 1981). Se debería añadir que, independientemente del tipo de suelo, y con algunas pocas excepciones, todos los suelos pueden desarrollar capas arables ácidas y, de modo similar, todos los tipos de suelos pueden tener una capa arable neutra después de la quema o de una aplicación de cal. Por tanto, en el manejo de los suelos, la acidez es más una propiedad del suelo resultante de las prácticas de manejo y de su programación, que una propiedad natural del suelo. La acidez del subsuelo, definiendo el subsuelo como aquellas capas de suelo situadas inmediatamente debajo de la capa disturbada por los cultivos, es realmente lo que se tiene en cuenta cuando se estima la extensión de la acidez del suelo. Esta acidez del subsuelo es importante porque limita la profundidad de enraizamiento de los cultivos sensibles al aluminio, y restringe por consiguiente la cantidad de agua disponible durante

1. Método Brunauer-Emmett-Teller (BET).

los períodos secos y la absorción de nutrimentos del subsuelo (Bandy, 1980). Además, es éste un proceso lento por medio del cual aun los suelos fuertemente fertilizados y encalados pueden trasladar bases hasta el subsuelo aunque esto sucede más rápidamente en suelos cuya CIC es baja.

Las fluctuaciones en la acidez de la superficie del suelo ocurren como respuesta a varios factores. La más significativa en las regiones tropicales es la reducción de la acidez causada por las cenizas después de una quema o la ocurrida por la adición de cal. La acidificación ocurre como respuesta a la adición de fertilizantes que forman ácidos, o más comúnmente por los ácidos orgánicos liberados durante las reacciones de descomposición propias de la degradación de la materia orgánica; ésta última es especialmente activa después de la iniciación de los cultivos (Stevenson, 1982). La duración y la intensidad del pH en la superficie del suelo y del flujo de aluminio intercambiables después de cualquiera de las prácticas culturales anteriores dependen de muchos parámetros y son más fácilmente medibles que predecibles. Se han registrado ejemplos de aumento de casi tres unidades de pH por influjo de la quema (Sánchez, 1975). En general, los suelos superficiales de textura arenosa responden más dramáticamente porque su CIC es baja y su contenido de materia orgánica es también bajo; no ocurre así en los suelos de textura más fina.

Resumen

Las características de los suelos tropicales son, probablemente, aún más diversas que las de suelos pertenecientes a regiones templadas. Algunas propiedades del subsuelo se pueden registrar en un mapa y son definibles según la clasificación taxonómica del suelo. La clasificación de los suelos y sus mapas se pueden utilizar para transferir los resultados de la investigación agronómica solamente cuando se conocen varias propiedades de la superficie del suelo, tanto en el sitio de la investigación como en el sitio de la extrapolación. Entre las propiedades de la superficie del suelo que se deben conocer, además de la clasificación, hay dos muy importantes: el valor del pH o el porcentaje de Al intercambiable, y la capacidad de fijación del fósforo junto con el nivel de fósforo disponible en el medio.

Tanto la caracterización del suelo por medio de los parámetros de clasificación clásicos como el conocimiento de las propiedades

móviles de la superficie del suelo se necesitan para desarrollar exitosamente una investigación agronómica de calidad.

Las propiedades del suelo en los trópicos se discuten, tanto desde el punto de vista de las propiedades semipermanentes empleadas para clasificarlo, como de las propiedades dinámicas relacionadas con su manejo, que se deben caracterizar en cada sitio. La mayoría de los criterios de clasificación de los suelos se basa en las propiedades del subsuelo porque éstas permiten una clasificación uniforme que no considera la cubierta vegetal o las prácticas de manejo. Esto permite una mejor evaluación de los usos potenciales de la tierra. Para extrapolar los resultados de la investigación relacionada con el manejo, se debe suministrar información sobre las características inducidas por el manejo, que usualmente pertenecen a los horizontes superficiales; esa información está contenida en mediciones hechas antes del establecimiento del lote y registradas como una de las condiciones del experimento.

Referencias

- Alvarado, A. 1982. Phosphate retention in Andepts from Guatemala and Costa Rica as related to other soil properties. Tesis (Ph.D.). Soil Science Department, North Carolina State University, Raleigh, NC, E.U. 82 p.
- Bandy, D. E. 1980. Deep lime experiment. En: Agronomic-economic research on soils of the tropics: 1978-1979 report. Soil Science Department, North Carolina State University, Raleigh, NC, E.U. p. 127-137.
- Buol, S. W.; Hole, F. D. y McCracken, R. J. 1980. Soil genesis and classification. 2 ed. Iowa State University Press, Ames, IA, E.U. 404 p.
- y Sánchez, P. A. 1978. Rainy tropical climates: Physical potential, present and improved farming systems. En: Plenary papers; eleventh congress. International Society of Soil Science, Edmonton, Canadá. p. 292-312.
- Juo, A. S. R. y Fox, R. L. 1977. Phosphate sorption characteristics of some Bench-Mark soils of West Africa. Soil Sci. 124:370-376.
- Kellogg, C. E. 1950. Tropical soils: Transactions of an international congress on soil science. v. 1. p. 266-276.

- Lepsch, I. F.; Boul, S. W. y Daniels, R. B. 1977. Soil-landscape relationships in the occidental plateau of São Paulo State, Brasil; 1: Geomorphic surfaces and soil mapping units. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 41:104-109.
- Moormann, F. R. 1972. Soil microvariability. En: *Soils of the humid tropics*. National Academy of Sciences, Washington, DC. p. 45-59.
- Pope, R. A. 1976. Use of soil survey information to estimate phosphate sorption by highly weathered soils. Tesis (Ph.D.). Soil Science Department, North Carolina State University, Raleigh, NC, E.U. 82 p.
- Sánchez, P. A. 1975. Properties and management of soils in the tropics. Wiley and Sons, Nueva York. 618 p.
- y Salinas, J. G. 1981. Low-input technology for managing Oxisols and Ultisols in tropical America. *Adv. Agron.* 34:279-406.
- ; Villachica, J. H. y Bandy, D. E. 1983. Soil fertility dynamics after clearing a tropical rainforest in Peru. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 47:1171-1178.
- Soil Survey Staff. 1975. Soil taxonomy. Agriculture handbook no. 436. U.S. Government Printing Office, Washington, D.C.
- Stevenson, F. J. 1982. Organic matter and nutrient availability. En: *Non-symbiotic nitrogen fixation and organic matter in the tropics; symposia papers I*. International Congress of Soil Science, 12th, Nueva Delhi, India. p. 137-151.
- USDA (United States Department of Agriculture)-SCS (Soils Conservation Service) y Soil Management Support Services. 1984. Sixth international soil classification workshop tour guide; Part 1: Chile, part 2: Ecuador. Washington, D.C.
- Veith, J. H. y Sposito, G. 1977. Reactions of aluminosilicates, aluminum hydrous oxides, and aluminum oxides with O-phosphate: The formation of X-ray amorphous analogs of variscite and montebasite. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 41:870-876.

Disponibilidad del Fósforo en los Suelos Ácidos del Trópico Americano

Luis A. León*

Introducción

El fósforo (P) es uno de los elementos más limitativos para el crecimiento de las plantas en los suelos ácidos del trópico (Guerrero, 1971; Van Wambeke, 1974). Su uso se halla restringido por la actual escasez mundial, los elevados precios de venta, y los costos del transporte a lugares de consumo donde se carece de una infraestructura adecuada (Kirkwood et al., 1973). A todo esto se suma el alto poder de fijación de P de algunos de estos suelos que hace más costosa su utilización (Gil, 1971).

Un mejor conocimiento de los mecanismos que siguen las reacciones de los fosfatos en los suelos ácidos del trópico puede ser de gran utilidad para predecir su comportamiento en cuanto a fijación, difusión, transformaciones, residualidad y aprovechabilidad. También sería útil en cuanto a la escogencia de mejores formas de aplicación.

Formas del Fósforo en los Suelos

De acuerdo con un cálculo efectuado a partir de información presentada por la Unidad de Recursos de Tierra (CIAT, 1981), cerca del 40% (358 millones de ha) de la región central de América del Sur tropical se puede incluir en la categoría de suelos ácidos (con saturaciones de Al mayores del 70%); más del 80% del área bajo uso agrícola, incluyendo praderas naturales, posee suelos con características ácidas. Una gran mayoría de éstos se puede clasificar como Ultisoles, Oxisoles e Inceptisoles.

A manera de ejemplo, en el Cuadro 1 se presentan las formas y cantidades del fósforo nativo del suelo para algunos suelos

* Científico de suelos. Proyecto Fósforo IFDC/CIAT, Apartado 6713, Cali, Colombia.

Cuadro 1. Formas y cantidades de fósforo en suelos superficiales de regiones tropicales de Colombia.

Suelo	Formas del P total															
	P total		P fácilmente reemplazable		P no apatítico, y Ca		P apatítico, y Ca		P y Al		P y Fe		P orgánico		Pinerte	
	ppm	%	ppm	%	ppm	%	ppm	%	ppm	%	ppm	%	ppm	%	ppm	%
Oxisol (Llanos Orientales)	436	100	-	-	19	4	-	-	30	7	66	15	272	62	38	9
Andosol (Altiplano de Pasto)	1467	100	10	1	106	7	27	2	214	14	207	14	136	9	765	52
Ultisol (Jamundi)	387	100	5	1	4	1	11	3	8	2	56	14	51	13	250	64

FUENTE: Guerrero, 1974.

del trópico colombiano, determinados por el método de Chang y Jackson (1957) con las modificaciones introducidas por Sen Gupta y Cornfield (1962).

Los suelos altamente meteorizados (Oxisoles) contienen cantidades totales de fósforo relativamente bajas. Prácticamente, es imposible obtener en ellos cantidades detectables de fosfatos solubles en agua y en NH_4Cl (P fácilmente reemplazable). El fósforo inorgánico se encuentra en fosfatos de hierro, aluminio y calcio no apatítico, hallándose en proporción mucho mayor los dos primeros (22% vs. 4% del P total). También se encuentra una cantidad apreciable de P inerte, es decir, aquél que no es posible extraerlo con ninguna de las soluciones utilizadas. El contenido de P orgánico es relativamente alto (62% del P total) pero hay que tener en cuenta que el contenido de materia orgánica de estos suelos se puede considerar como promedio (4.0%). Se han encontrado fosfatos de calcio no apatíticos. No es sorprendente que estos suelos sean tan deficientes en fósforo, siendo tan baja la cantidad de este elemento y la poca solubilidad de las formas presentes.

Los suelos derivados de deposiciones de cenizas volcánicas (Andosol del altiplano de Pasto) contienen altas cantidades de fósforo, si se comparan con los Ultisoles y Oxisoles, predominando en ellos el fósforo inerte y los fosfatos de aluminio, de hierro y de calcio no apatítico.

Aparentemente, los Andosoles de Colombia están formados por materiales recientes y la meteorización sería muy limitada. A pesar de que el fósforo total es alto, los cultivos que crecen en estos suelos responden notoriamente a la fertilización fosfórica. Predecir la posible respuesta de los cultivos mediante el fraccionamiento de los fosfatos no parece un método muy apropiado, por lo menos en el caso de los suelos volcánicos.

La distribución de los fosfatos en los Ultisoles (Jamundí) es muy similar a la de los Oxisoles, excepto que en los primeros se encuentra una mayor proporción del fósforo inerte y una menor del fósforo orgánico.

El Fósforo Orgánico y su Metabolismo

Estudios realizados por Blasco (1974) en suelos de 12 regiones de Colombia, cuya altitud variaba entre 50 y 3500 msnm y que

tenían una amplia variación en el fósforo orgánico (2-873 ppm), indicaron, como se observa en la Figura 1 con un suelo de Coconucos, que el fenómeno de la inmovilización supera al de la mineralización. Es posible, según el autor, que la abundancia de Inositoles con los que se asocia el fósforo lo hace difícilmente biodegradable; en otras palabras, la forma en que se encuentra el P lo hace, en parte, responsable del problema de su retención en los suelos ácidos tropicales.

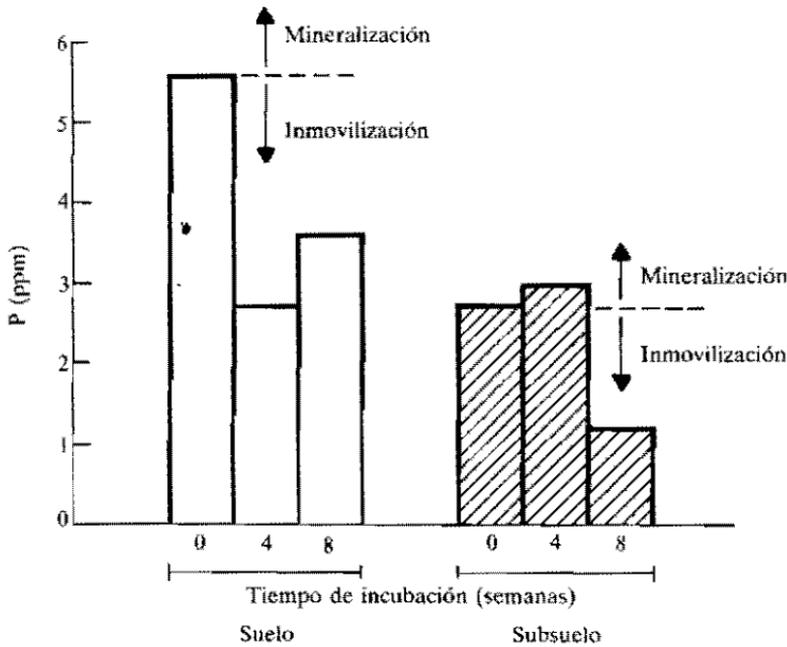


Figura 1. Metabolismo del fósforo en los suelos de Coconucos, Cauca, Colombia.

FUENTE: Blaseo, 1974.

El Fósforo Inorgánico y sus Formas Presentes en el Suelo

El grado de meteorización química que haya tenido lugar se encuentra relacionado con las formas de fósforo inorgánico presentes en el suelo. El Cuadro 2 nos muestra, como ejemplo, los suelos de Venezuela estudiados por Westin y De Brito (1969). Los fosfatos de calcio disminuyeron a medida que la meteorización se hizo más intensa. En cambio, los fosfatos de hierro (más insolubles) aumentaron considerablemente. También parece

Cuadro 2. Distribución del fósforo activo inorgánico en suelos de los trópicos en relación con su estado de meteorización.

Grado de meteorización	Distribución porcentual de los fosfatos inorgánicos activos (%)		
	P-Ca	P-Al	P-Fe
Muy fuerte	4	0	96
Fuerte	6	20	74
Moderado	23	13	64
Débil	38	16	46

FUENTE: Westin y De Britto, 1969.

que los fosfatos ocluidos predominaban sobre otras formas de fósforo inorgánico en suelos viejos clasificados como Oxisoles (Dahnke et al., 1964).

Entre los factores que determinan la formación de compuestos de fósforo en el suelo se pueden enumerar: el pH, la actividad de los cationes cuando los compuestos de fósforo son solubles, las propiedades mineralógicas del suelo, y las condiciones de topografía y drenaje (Hsu y Jackson, 1960).

El pH controla principalmente la transformación de los fosfatos de un compuesto catiónico a otro. A medida que un suelo se acidifica, los fosfatos de calcio, relativamente solubles, se transforman en compuestos de hierro y aluminio que son menos solubles. Cuando el pH del suelo es mayor de 6.0, como es el caso de los suelos aluviales de algunos valles de Colombia, un alto porcentaje del fósforo inorgánico se encuentra en forma de compuestos de calcio (Guerrero, 1974).

Otro efecto importante es el régimen de humedad del suelo. En suelos que se hallan en áreas con estaciones de sequía y humedad definidas, como en el caso de los Llanos Orientales de Colombia, una alta proporción del fósforo inorgánico (52%) se encuentra en forma de fosfatos de hierro. El drenaje impedido parece favorecer la formación de fosfatos de aluminio. Un ejemplo típico se puede hallar en los suelos del Valle del Sibundoy, donde los fosfatos de aluminio representan un 50% del fósforo inorgánico (Guerrero, 1974).

Reacción del Suelo a los Fertilizantes Fosfatados

Cuando se añade un fertilizante fosfatado a un suelo, comienza a solubilizarse y a reaccionar más o menos rápidamente con los

compuestos del suelo; la velocidad de esta reacción depende, entre otras cosas, de la tasa de solubilidad del fertilizante, del pH que se desarrolla alrededor del mismo, y de la naturaleza de los compuestos que hacen parte del suelo.

En un suelo ácido mineral, los fosfatos reaccionan con los compuestos de hierro y aluminio para formar compuestos menos solubles. En suelos derivados de cenizas volcánicas, generalmente altos en materia orgánica, parece que estos fosfatos reaccionan con componentes aluminicos para formar complejos fosforados (Ospina, 1974). De acuerdo con numerosos investigadores citados por Ospina (1974), la retención de fosfatos por la materia orgánica parece ser o muy baja o ninguna.

No está muy bien definido el papel que desempeña el aluminio, en todas sus formas, en la retención del fósforo en los Andosoles. Sin embargo, como se muestra en la Figura 2, Schalscha y colaboradores (1972) encontraron una alta correlación entre la fijación de los fosfatos y el aluminio reactivo, determinado por titulación potenciométrica a pH 8.2-8.5, en los suelos de Chile derivados de cenizas riolíticas. Este aluminio parece estar asociado, en gran parte, con la fracción mineral. Aparentemente, en los Andosoles la alófana interviene activamente en la retención de los fosfatos y se puedan formar compuestos cristalinos de composición química similar a las taranakitas (Wada, 1959).

Fassbender (1974) utilizó la técnica del diagrama de solubilidad de los fosfatos, que considera el potencial fosfórico ($\text{pH} + \text{pH}_2\text{PO}_4$) y los potenciales cálcico ($\text{pH} - 0.5 \text{ pCa}$) y aluminico ($\text{pH} - 0.33 \text{ pAl}$), para identificar los fosfatos inorgánicos en un grupo de suelos forestales derivados de cenizas volcánicas en Antioquia, Colombia.

La Figura 3, permite presumir que la forma predominante de los fosfatos inorgánicos se encuentra asociada con el aluminio, siendo éstos amorfos. Fassbender no encontró fosfatos de aluminio cristalinos en estos suelos lo mismo que en los suelos de América Central. Tal como se muestra en la Figura 4, el grado de desarrollo del suelo puede tener relación con la mayor o menor reacción de los fosfatos con el mismo suelo (Ospina, 1974).

En el caso de los suelos ácidos minerales, tal como se indicó al comienzo de este capítulo, los compuestos de hierro y aluminio reaccionan con los fosfatos aplicados al suelo para formar

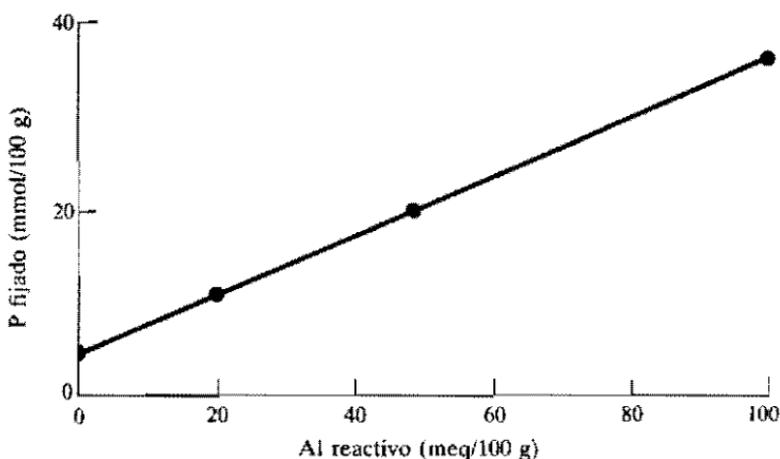


Figura 2. Relación entre el Al reactivo y el P fijado en los Andosoles de Chile.

FUENTE: Schalscha et al., 1972.

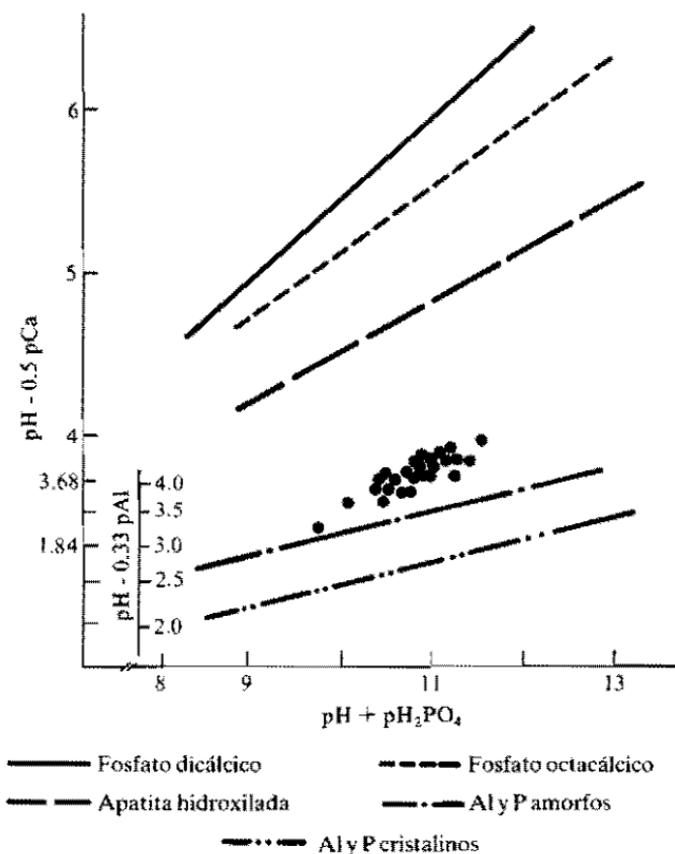


Figura 3. Identificación de fosfatos inorgánicos en un cultivo de ciprés en Medellín, Colombia.

FUENTE: Fassbender, 1974.

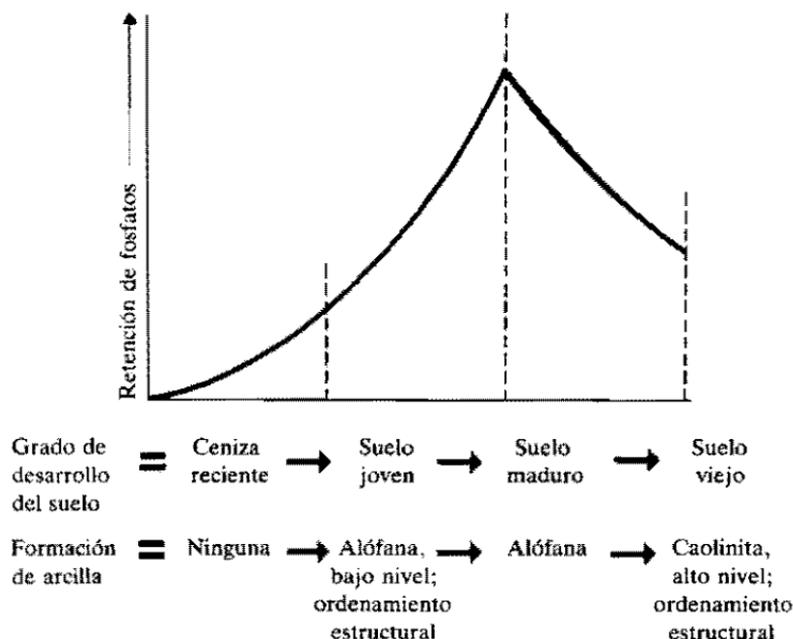


Figura 4. Posible relación entre el grado de desarrollo del suelo y la retención de fosfatos.

FUENTE: Ospina, 1974.

compuestos relativamente insolubles. Si se remueven los óxidos de hierro libre y de aluminio del suelo, la cantidad de fosfatos adsorbidos se reduce notablemente (Coleman et al., 1960).

En el Cuadro 3 se presentan algunos datos de Pratt et al. (1969) sobre la fijación de fosfatos en suelos del Brasil relacionada con su contenido de óxidos de hierro. Si se agrupan los suelos taxonómicamente, se puede observar una alta correlación entre el fósforo fijado y el contenido de óxidos de hierro libres, pero los Oxisoles adsorben menos fósforo que los Ultisoles a un determinado contenido de estos óxidos.

Cuadro 3. Fijación del fósforo en los suelos de Brasil con relación a su contenido de óxido de hierro.

Suelos	Oxidos de hierro libres (%)	Fijación de fósforo (meq/ha de suelo)
Ultisol	2.1	1.5
	6.5	4.5
Oxisol	4.0	1.8
	19.9	4.5

FUENTE: Pratt et al., 1969.

Estas diferencias en adsorción se pueden atribuir a diferencias en las formas del óxido de hierro o a diferencias en la superficie expuesta —o a ambas causas. Es posible que el hierro hallado en los Oxisoles sea de naturaleza más cristalina que aquel de los Ultisoles (Kamprath, 1974).

Otro mecanismo importante en la fijación del fósforo en los suelos ácidos minerales es su reacción con el aluminio intercambiable y con los productos de esta hidrólisis (Coleman et al., 1960). Se ha sugerido el siguiente esquema para dicha reacción:



en la cual M puede ser calcio, potasio o sodio.

El Cuadro 4 presenta datos de las reacciones de los fosfatos con los suelos altamente meteorizados. Como se puede observar, las formas de fósforo extraídas del suelo después de añadir este elemento fueron principalmente fosfatos de hierro y aluminio. El Ultisol, que contenía caolinita en cantidades apreciables, mostró mayor aumento en la fracción de los fosfatos unidos al aluminio que en aquella de los fosfatos unidos al hierro. En cambio, el Oxisol, con poca caolinita y alto contenido de óxido de hierro, mostró un incremento notable en el fósforo unido al hierro (Dumbar y Baker, 1965).

Cuadro 4. Formas de fósforo extraídas cuando se adicionaron fosfatos a un Oxisol y a un Ultisol.

Suelo	Oxidos de hierro libres (%)	Distribución del fósforo agregado (ppm)		
		P-Ca	P-Al	P-Fe
Ultisol	2.3	7	296	133
Oxisol	12.7	14	95	300

FUENTE: Dumbar y Baker, 1965.

Según las investigaciones realizadas por los científicos de la Tennessee Valley Authority (TVA) (Lindsay y Stephenson, 1959), los productos formados de la reacción entre un suelo y el fosfato monocalcico son compuestos complejos de fósforo que contienen aluminio, hierro, potasio y calcio.

El Cuadro 5 presenta las transformaciones, como función del tiempo, de los fosfatos que se forman en el suelo. Con el tiempo,

Cuadro 5. Cambios en los fosfatos formados en un Oxisol de Carimagua en relación con el tiempo en que estuvieron en contacto con el P aplicado (350 ppm P).

Formas de P	P en suelo (ppm) después de: ^a			
	0 DPA	20 DPA	35 DPA	50 DPA
P fácilmente reemplazable	0	0	0	0
P y Ca no apatíticos	1.5	10	8	8
P-Al	15	80	70	70
P-Fe	30	180	200	200
P y Ca apatíticos	3	5	5	12
P mineral	49.5	275	283	290
P orgánico	71.5	185	177	170

a. DPA = días después de aplicar el P.

FUENTE: Gil, 1971.

los fosfatos de aluminio formados en un suelo de Carimagua (Oxisol) disminuyeron, mientras que los fosfatos de hierro aumentaron. Posiblemente, los fosfatos de aluminio fueron parcialmente utilizados por las plantas y la otra parte se transformó en fosfatos de hierro más insolubles.

Alternativas para Mejorar el Fósforo Aprovechable del Suelo

Como la alternativa de utilizar fosfatos solubles de alta concentración resulta generalmente poco económica o implica un elevado riesgo para el agricultor, el uso de rocas fosfóricas locales finamente molidas parece ser bastante promisorio. Estudios realizados por el Proyecto Fósforo IFDC/CIAT (CIAT, 1982) en América Latina indican que las aplicaciones directas de rocas fosfóricas son más efectivas cuando se hacen en suelos ácidos (pH 4.0-5.5) muy bajos en calcio y en fósforo aprovechable. Ciertos cultivos, como leguminosas y gramíneas forrajeras, yuca, arroz de riego y de secano, maní y caupí pueden utilizar el fósforo de las rocas fosfóricas en forma más efectiva que los cereales, el maíz, la papa y el frijol. Sin embargo, en suelos muy ácidos, muy deficientes en fósforo y con baja capacidad de fijación de este elemento, casi todos los cultivos han mostrado algún grado de respuesta a las rocas fosfóricas, sobre todo si se

trata de materiales de origen sedimentario y de reactividad alta o media.

Cuando el uso de rocas fosfóricas se halla restringido por su baja reactividad, por el cultivo o por propiedades adversas del suelo como la alta fijación de fósforo, es necesario transformar esas rocas mediante procesos químicos o térmicos que incrementen el fósforo soluble en agua y en citratos (León, 1980). Con rocas de media o baja reactividad se han obtenido excelentes resultados agronómicos en cultivos como frijol, maíz y papa cuando aquéllas han sido parcialmente aciduladas con ácido sulfúrico o fosfórico. Resultados similares se han encontrado cuando las rocas se granulan junto con un superfosfato triple (CIAT, 1982; Hammond et al., 1980).

Cal y Silicatos para Mejorar la Aprovechabilidad del Fósforo

Sobre este tema se han realizado numerosísimas investigaciones que generalmente han dado respuestas positivas, sobre todo cuando se utilizan fuentes de fósforo muy solubles (Bornemisza y Alvarado, 1974; Sánchez, 1976). El efecto de la cal y los silicatos en el caso de las rocas fosfóricas ha sido extensamente estudiado en los trópicos, pero algunos estudios indican que los resultados obtenidos son extremadamente variables y dependen, entre otros casos, de las propiedades del suelo, del tipo de roca, y del cultivo en estudio (CIAT, 1976).

Más Eficiencia con Métodos de Aplicación de Fuentes de Fósforo

Los suelos altamente fijadores de fósforo son generalmente manejados de forma que los fertilizantes fosfatados solubles en agua sean aplicados en banda, disminuyendo así el volumen del suelo que podría reaccionar con este elemento. En la mayoría de los casos, el costo de la fertilización con fósforo es muy alto en América Latina; Sánchez y Salinas (1983), han propuesto por ello varias alternativas entre las que se encuentra la selección de métodos más efectivos de aplicación del fertilizante.

Han sido muchas las alternativas propuestas y estudiadas, las cuales han dado muy buenos resultados dependiendo del suelo

y del cultivo en cuestión (Sánchez, 1976). Modificaciones de estos métodos de aplicación se están ensayando actualmente en algunos países tropicales de América Latina. Entre ellas están:

- aplicar rocas fosfóricas a voleo y superfosfato triple en banda o en faja en niveles y proporciones diferentes;
- aplicar las fuentes de fósforo en forma tal que el contenido de fósforo en el suelo se eleve sólo de un 10% a un 15% en el volumen total de la superficie arada. Para ello, se aplican los fertilizantes (simples o en mezclas) en una faja (banda ancha) en la superficie y luego se incorporan; o se aplican a voleo grandes gránulos de superfosfato triple de forma que alrededor de cada gránulo se produzca una zona muy alta en fósforo;
- aplicar a voleo e incorporar luego rocas fosfóricas en gránulos de varios tamaños; y
- aplicar el fertilizante a voleo sin incorporarlo, como se hace en arroz inundado y en pastos.

Selección de Especies y Variedades Tolerantes a la Baja Aprovechabilidad del Fósforo

Así como se encuentran diferencias entre especies y variedades en su tolerancia a altas concentraciones de aluminio en la solución del suelo y a bajas concentraciones de calcio (Foy, 1974), también se encuentran plantas que requieren muy poco fósforo para lograr rendimientos máximos, o que lo pueden tomar de fuentes poco solubles como algunas rocas fosfóricas (Sánchez, 1976; Sánchez y Salinas, 1983).

Las diferencias de los cultivos o variedades se pueden medir mediante los llamados requerimientos externos e internos, por las tasas de absorción y traslocación, o por efectos ocurridos en la rizosfera (Sánchez y Salinas, 1983). Deist y otros (1971) observaron que las dicotiledóneas pueden utilizar mejor el fósforo proveniente de las rocas fosfóricas que las monocotiledóneas. Un ensayo realizado en el CIAT muestra cómo ecotipos y variedades de *Stylosanthes* pueden tomar el fósforo de fuentes poco aprovechables, como es el caso de la roca fosfórica del Huila. Se observan aquí también diferencias en rendimiento entre ecotipos y variedades (CIAT, 1976).

Respuesta a la Inoculación con Micorrizas

La presencia de una infección en algunas raíces de plantas que tengan micorrizas vesículo-arbusculares aumenta su habilidad para tomar fósforo, especialmente en suelos deficientes en este elemento.

Este tipo de hongo produce una red de hifas que se extiende lejos de las raíces aumentando el volumen de suelo explotado y mejorando la eficiencia de la absorción de fósforo por la planta (Howeler, 1983). Hay evidencia de que algunos cultivos dan respuesta a la inoculación con micorrizas. Es posible que la inoculación con estos microorganismos sea un medio adicional de disminuir los requerimientos de fósforo de ciertos cultivos.

Resumen

El fósforo es uno de los elementos más limitativos del crecimiento de las plantas en los suelos ácidos del trópico que presenten un alto porcentaje de saturación de aluminio. El uso del P se halla restringido por la escasez mundial, los elevados precios de venta, y el costo de transportarlo a lugares de consumo donde se carezca de una infraestructura adecuada. A todo esto se suma el alto poder de fijación del fósforo de algunos de estos suelos, que hace más costosa su utilización.

Los suelos altamente intemperizados contienen cantidades totales de fósforo relativamente bajas. El fósforo inorgánico de estos suelos se halla en fosfatos de hierro, de aluminio y de calcio no apatítico. Hay en ellos cantidades apreciables de fósforo inerte (ocluido) y su contenido de fósforo orgánico es relativamente alto.

El grado de meteorización química se encuentra relacionado con las formas de fósforo inorgánico presentes en el suelo. Los fosfatos de calcio disminuyen a medida que la meteorización se hace más fuerte y los de aluminio y hierro, más insolubles, aumentan considerablemente.

En los suelos ácidos minerales, los fosfatos añadidos como fertilizantes reaccionan generalmente con compuestos de hierro y aluminio para formar fosfatos poco solubles. Si se remueven

los óxidos de hierro y aluminio libres del suelo, la cantidad de fosfatos adsorbidos se reduce notablemente. En el caso de los Andosoles, parece que la alófana interviene activamente en la retención de fosfatos y también se forman compuestos cristalinos semejantes a las taranaquitas.

En la actualidad resulta poco económico tratar de saturar la capacidad de adsorción de fósforo mediante el uso de fuentes solubles y de alta concentración de este elemento. El uso de fuentes de fósforo de menor costo, tales como las rocas fosfóricas locales, las escorias básicas y las modificaciones químicas (por acidulación parcial) o térmicas de las rocas fosfóricas pueden ofrecer oportunidades para suplir los requerimientos de fósforo con una menor inversión. Por otra parte, es posible que resulte más económico su uso empleando diferentes métodos de aplicación y utilizando mezclas de rocas fosfóricas con materiales formadores de ácidos tales como el azufre, las piritas, los superfosfatos y el sulfato de amonio. La eficiencia de la aplicación de fosfatos solubles puede incrementarse en ciertos casos mediante la adición de cal o de silicatos. Existe también la alternativa de cultivar especies o variedades que estén adaptadas a aquellos suelos ácidos cuyo nivel de fósforo disponible sea bajo, o que puedan tomarlo de fuentes poco solubles, ya sea directamente o mediante la ayuda de micorrizas nativas o inoculadas al suelo.

Referencias

- Blasco, M. 1974. El fósforo orgánico y su metabolismo en los suelos: El fósforo en zonas tropicales. *Suelos Ecuat.* 6(1):19-43
- Bornemisza, E. y Alvarado, A. (eds.). 1974. Manejo de suelos en la América tropical (University consortium on soils of the tropics.) Soil Sci. Dept., North Carolina State Univ., Raleigh, NC, E.U.
- CIAT (Centro Internacional de Agricultura Tropical). 1976. Informe anual 1975. CIAT, Cali, Colombia. p. v.
- . 1981. Annual review 1980; special studies: Land Resources Unit. Internal document. CIAT, Cali, Colombia. 69 p.
- . 1982. Efectividad agronómica de las rocas fosfóricas; guía de estudio. [Complemento de la Unidad Audiotutorial sobre el mismo tema.] (Serie 04SR-09.05). CIAT, Cali, Colombia. 40 p.
- Chang, S. C. y Jackson, M. L. 1957. Fractionation of soil phosphorus. *Soil Sci.* 84:133-144.

- Coleman, N. T.; Thorup, J. T. y Jackson, W. A. 1960. Phosphate-sorption reactions that involve exchangeable Al. *Soil Sci.* 90:1-7.
- Dahnke, W. C.; Malcolm, J. L. y Méndez, M. E. 1964. Phosphorus fractions in selected soil profiles of El Salvador as related to their development. *Soil Sci.* 98:33-38.
- Deist, J.; Marais, P. G.; Harry, R. B. A. y Heyns, C. F. G. 1971. Relative availability of rock phosphate to different plant species. *Agrochemophysica* 3:35-40.
- Dunbar, A. D. y Baker, D. E. 1965. Use of isotopic dilution in a study on inorganic phosphorus fractions from different soils. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 29:259-262.
- Fassbender, H. W. 1974. Aspectos fisicoquímicos de las interacciones del fósforo con otros elementos: El fósforo en zonas tropicales. *Suelos Ecuat.* 6(1):45-66.
- Foy, C. E. 1974. Effects of aluminum on plant growth. En: Carson, E. W. (ed.). *The plant root and its environment*. Univ. Press of Virginia, Charlottesville, VA, E.U. p. 601-642.
- Gil, F. 1971. Efecto del encalamiento en la acidez y diferentes formas de fósforo en un suelo de los Llanos Orientales de Colombia. Tesis (M.S.). Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia.
- Guerrero, R. R. 1971. Soils of the Colombian Llanos Orientales: Composition and classification of selected soil profiles. Tesis (Ph.D.). North Carolina State Univ., Raleigh, NC, E.U. 78 p.
- . 1974. Formas de fósforo y sus relaciones con la fertilidad de los suelos: El fósforo en zonas tropicales. *Suelos Ecuat.* 6(1): 349-388.
- Hammond, L. L.; Chien, S. H. y Polo, J. R. 1980. Phosphorus availability from partial acidulation of two phosphate rocks. *Fert. Res.* 1:37-49.
- Howeler, R. H. 1983. La función de las micorrizas vesículo-arbusculares en la nutrición fosfórica de la yuca. *Suelos Ecuat.* 13(2):51-61.
- Hsu, P. H. y Jackson, M. L. 1960. Inorganic phosphate transformations by chemical weathering in soils as influenced by pH. *Soil Sci.* 90:16-24.
- Kamprath, E. J. 1974. Aspectos químicos y formas minerales del fósforo del suelo en regiones tropicales: El fósforo en zonas tropicales. *Suelos Ecuat.* 6(1):1-18.

- Kirkwood, J. I.; Pietri, P.; Polanco, J. C. y Chang, Y. P. (eds.). 1973. Reporte del Primer Simposio Internacional sobre suelos de sabana en el trópico. Texas A&M University y Universidad de Puerto Rico. 223 p.
- León, L. A. 1980. El uso de rocas fosfóricas en suelos ácidos del trópico americano. En: Silva, F. (ed.). Fertilidad de suelos: Diagnóstico y control. Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo, Bogotá, Colombia. p. 359-397.
- Lindsay, W. L. y Stephenson, H. F. 1959. Nature of the reactions of monocalcium phosphate monohydrate in soils; I: The solution that reacts with the soil. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 23:12-18
- Ospina, O. 1974. El fósforo de los Andosoles: El fósforo en zonas tropicales. *Suelos Ecuat.* 6(1):97-135.
- Pratt, P. F.; Peterson, F. F. y Holzhey, C. S. 1969. Qualitative mineralogy chemical properties of a few soils from São Paulo, Brasil. *Turrialba* 19:491-496.
- Sánchez, P. A. 1976. Properties and management of soils in the tropics. Wiley and Sons, Nueva York, NY, E.U. 618 p.
- y Salinas, J. G. 1983. Suelos ácidos: Estrategias para su manejo con bajos insumos en América tropical. Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo, Bogotá, Colombia. 93 p.
- Schalscha, E. P.; Pratt, P. F. y González, C. 1972. Reactive aluminum estimated from the formation of magnesium-aluminum double hydroxide. *Soil Sci. Am. Proc.* 36:752-755.
- Sem Gupta, M. B. y Cornfield, A. H. 1962. Phosphorus in calcareous soils; I: The inorganic phosphorus fractions and their relation to the amount of calcium carbonate present, *J. Sci. Food Agric.* 13:625-655.
- Van Wambeke, A. 1974. Management properties of Ferralsols. *FAO Soils Bull.* 23:129.
- Wada, K. 1959. Reaction of phosphate with allophane and halloysite. *Soil Sci.* 87:325-330.
- Westin, F. C. y De Brito, J. C. 1969. Phosphorus fractions of some Venezuelan soils as related to their stage of weathering. *Soil Sci.* 107:194-202.

Metodología para el Análisis de los Suelos Tropicales

Octavio Mosquera V.*

Introducción

Cuando se estudia una metodología para el análisis de los suelos tropicales, debe tenerse en cuenta que en los trópicos no existe un grupo homogéneo de suelos como para desarrollar una tecnología que los cobije a todos. En realidad, en las regiones tropicales pueden encontrarse suelos representativos de todos los órdenes desde los Entisoles hasta los Histosoles (Cuadro 1). Cuando se hace mención de los suelos ácidos e infértiles de América tropical, generalmente nos referimos a las grandes extensiones de Ultisoles y Oxisoles que se encuentran en dicha región; estos suelos no son bien aprovechados en la producción agropecuaria, debido tanto a limitaciones edáficas (Cuadro 2) como a la carencia de una infraestructura adecuada, principalmente en cuanto a vías de comunicación. Para responder a los requerimientos alimenticios de una población en rápido crecimiento, es necesario ampliar la frontera agrícola hacia esas zonas que, técnicamente explotadas, pueden sostener una agricultura continuada; pues bien, para explotar técnicamente esos suelos, es necesario conocer sus limitaciones y sus ventajas.

Cuadro 1. Distribución aproximada de los principales órdenes de suelos en América tropical.

Orden	Area (millones ha)
Oxisol	502
Ultisol	320
Inceptisol	204
Alfisol	183
Entisol	124

FUENTE: Sánchez y Salinas, 1983.

* Laboratorio de Servicios Analíticos, Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), Cali, Colombia.

Cuadro 2. Extensión geográfica de las principales limitaciones edáficas en regiones de América tropical donde predominan suelos ácidos e infértiles.

Limitación edáfica	América tropical ^a		Región de suelos ácidos e infértiles ^b	
	Área (millones ha)	%	Área (millones ha)	%
Deficiencia de N	1332	89	969	93
Deficiencia de P	1217	82	1002	96
Deficiencia de K	799	54	799	77
Alta fijación de P	788	53	672	64
Toxicidad de Al	756	51	756	72
Deficiencia de Ca	732	49	732	70
Deficiencia de Mg	731	49	739	70
Baja CICE	620	41	477	55

a. Área total: 1493 millones ha.

b. Área total: 1043 millones ha.

FUENTE: Salinas, 1981.

La caracterización de los suelos ácidos es algo diferente a la caracterización de los suelos de las zonas templadas. En los suelos ácidos es muy importante determinar el aluminio intercambiable (Al) el cual, en muchos casos, ocupa un alto porcentaje de la capacidad de cambio efectiva (CIC). Por otra parte, el hecho de que la mayoría de estos suelos presente una carga dependiente del pH hace que la CIC, determinada según el método del acetato de amonio, no refleje su verdadera capacidad para retener nutrientes aprovechables para las plantas.

Metodología para el Análisis

Los iones Al son adsorbidos fuertemente por el complejo de cambio del suelo. Además, el aluminio desplazado sólo permanece en solución a un pH menor de 5.0. Por tanto, para la extracción del Al intercambiable es necesario que haya una alta concentración del ion que lo desplaza y que el pH de la solución sea suficientemente bajo para mantenerlo en forma soluble. Esto puede lograrse utilizando una solución 1N de KCl, la cual no tiene capacidad 'bófer' (tampón) a diferencia del acetato de amonio tradicionalmente usado para la extracción de los cationes intercambiables. La concentración de aluminio en la solución del suelo está relacionada con el pH del mismo, con el porcentaje de saturación de aluminio, y con la concentración de sales del sistema. Cuando el pH del suelo baja hasta 5.5, la concentración de Al aumenta notablemente. Lo mismo acontece cuando la saturación de Al pasa del 60% (Figura 1).

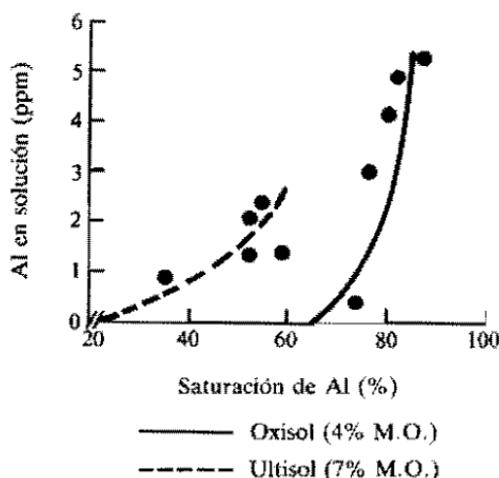


Figura 1. Relación entre la saturación de Al y el Al presente en la solución del suelo. Se observa también la influencia de la M.O.

FUENTE: Ayarza y Salinas, 1982.

En la actualidad se acepta que si el pH del suelo (en agua, relación 1:1) es menor que 5.5, el Al, el Ca y el Mg intercambiables deben extraerse con una solución 1N de KCl, mientras que si el pH es mayor o igual a 5.5, los cationes intercambiables pueden extraerse con una solución 1N de acetato de amonio. Determinadas las concentraciones de Al, Ca y Mg, pueden calcularse sus respectivos porcentajes de saturación. Para el caso del Al, este valor se obtiene según la fórmula:

$$\text{Sat. Al, \%} = \frac{\text{Al (meq/100 g)}}{\text{Al} + \text{Ca} + \text{Mg}} \times 100$$

Esta fórmula ha sido ampliamente usada tanto para caracterizar los suelos ácidos respecto a su posible toxicidad por Al como para evaluar la tolerancia de especies y cultivares a dicho efecto. En la Figura 2, por ejemplo, se presenta la relación entre el rendimiento de la yuca y el porcentaje de saturación de Al. Como puede apreciarse, la yuca es un cultivo bastante tolerante a la presencia de Al pues sólo cuando la saturación de éste pasa del 80% se presenta una reducción drástica en el rendimiento. Algo muy diferente ocurre con el frijol, un cultivo susceptible al aluminio; en él, una saturación mayor del 10% causa severas pérdidas en producción.

Las variaciones en comportamiento y en respuesta de especies y cultivares a las condiciones de acidez han dado lugar al

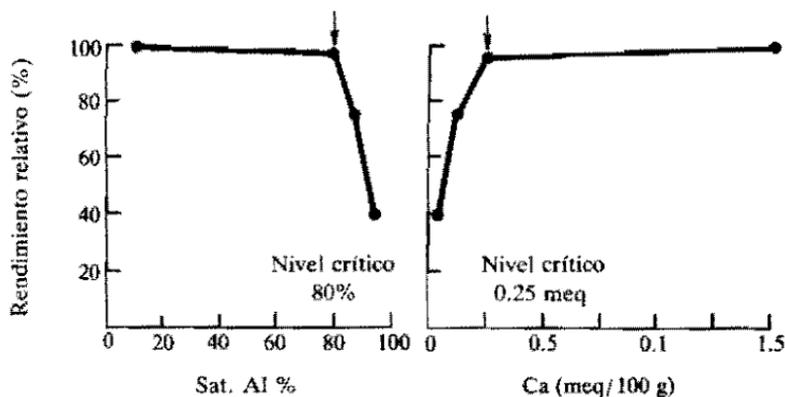


Figura 2. Relación entre el rendimiento relativo de la yuca (promedio de 42 variedades) y el porcentaje de saturación de Al, de un lado, y el contenido de Ca, de otra.

FUENTE: CIAT, 1978.

establecimiento de una estrategia para el manejo de la acidez del suelo que incluye los siguientes puntos:

- Aplicación de cal para reducir la saturación de Al por debajo de niveles tóxicos para sistemas agrícolas específicos.
- Aplicación de cal para suministrar Ca y Mg a las plantas y para estimular su movimiento hacia el subsuelo (donde pueden considerarse como reservas).
- Uso de especies y cultivares tolerantes a las toxicidades de Al y Mn.

Desde hace aproximadamente dos décadas, las recomendaciones para el encalamiento de los suelos minerales se han basado en la ecuación:

$$\text{meq Ca/100 g de suelo} = 1.5 \text{ meq AL/100 g}$$

que se ha preferido a la recomendación de una cantidad específica de cal para obtener un valor dado del pH del suelo. Sin embargo, últimamente se ha encontrado que, para varios cultivos, dicha ecuación sobreestima los requerimientos de cal debido al grado diferencial de tolerancia que presentan las diversas especies y cultivares. Para evitar este problema, Cochrane et al. (1980) desarrollaron la siguiente ecuación:

$$\text{Cal, t/ha} = 1.5 [\text{Al} - \text{SRA}(\text{Al} + \text{Ca} + \text{Mg})] D_a$$

donde Al, Ca y Mg están dados en meq/100 g por el análisis del suelo, D_a es la densidad aparente del suelo, y se introduce el

concepto de Saturación Requerida de Aluminio (SRA) que es característica para cada especie o cultivar considerado. Con este método se ahorra una buena cantidad de cal, reduciendo así los costos de producción y evitando los problemas del sobreencalamiento, especialmente las deficiencias inducidas de los micronutrientes.

El efecto de la aplicación de cal en el aluminio de la solución del suelo y en el rendimiento de varias especies puede apreciarse en las Figuras 3 y 4. Se observa que, aplicando cal a niveles entre 1.5 y 2 t/ha, la concentración de Al en la solución baja a menos de 1 ppm (disminuyendo así el riesgo de toxicidad), y que los rendimientos, especialmente de yuca y sorgo, superan el 80% del rendimiento máximo. Por otra parte, en el Cuadro 3 se observa el efecto del encalamiento en algunas propiedades químicas de un Ultisol de Quilichao, Colombia. A medida que el pH y el Ca aumentan, el Al y su saturación disminuyen considerablemente.

La deficiencia de fósforo es una de las limitantes edáficas más difundidas en América tropical. Aproximadamente un 96% del área cubierta por Oxisoles y Ultisoles presenta deficiencia de este nutrimento. El problema se agrava, además, por la alta capacidad de fijación de fósforo ampliamente extendida en la región. El alto

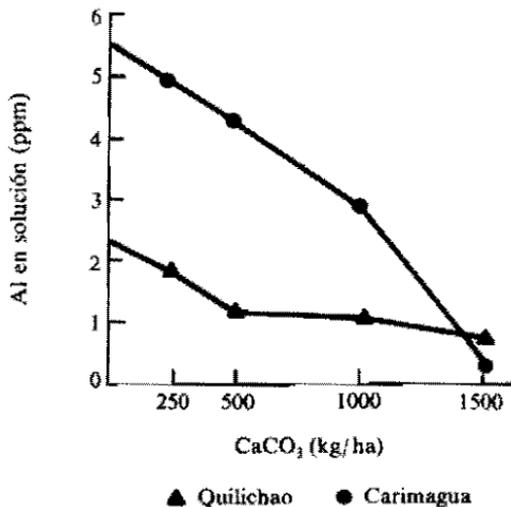


Figura 3. Efecto de los niveles de cal en la concentración de Al, en la solución de los suelos de Carimagua y Quilichao.

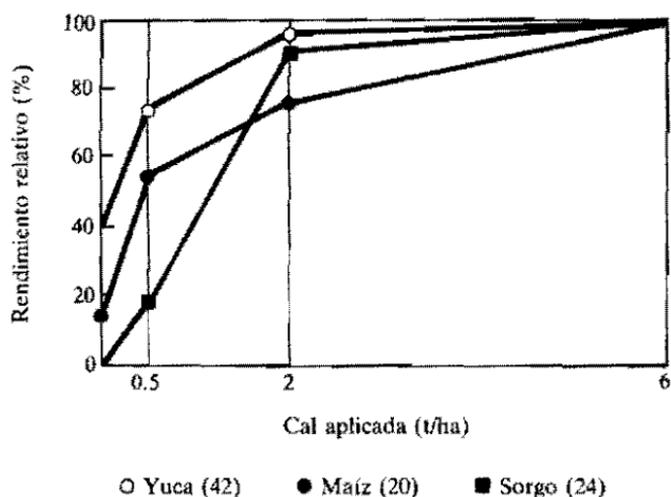


Figura 4. Rendimiento relativo de tres especies en relación con cuatro niveles de cal en un oxisol de Carimagua, Colombia. Las cifras entre paréntesis indican el número de variedades ensayadas.

FUENTE: CIAT, 1977.

costo de los fertilizantes fosfatados exige que, para estos suelos, se desarrollen tecnologías que permitan una mayor eficiencia en la utilización del P aplicado. Con tal fin, se ha desarrollado una estrategia para el manejo apropiado del fósforo en cultivos y pasturas establecidos en suelos ácidos, que consiste principalmente en los dos puntos siguientes:

Determinación de la combinación más apropiada de métodos y dosis de aplicación de P para estimular los efectos iniciales y residuales.

Mejoramiento de los procedimientos de evaluación de la fertilidad del suelo para recomendar aplicaciones de P.

Cuadro 3. Efecto del encalamiento en las características químicas de un suelo de CIAT-Quilichao.

Cal (t/ha)	Elementos del suelo (meq/100 g)					Sat. de Al (%)	Elementos del suelo (ppm)	
	pH	Al	Ca	Mg	K		Mn	P
0	4.05	3.90	0.69	0.23	0.15	77	49	21.8
0.5	4.17	3.57	1.13	0.25	0.15	69	51	20.9
2	4.55	2.07	3.01	0.28	0.15	37	35	17.1
6	5.30	0.20	7.09	0.28	0.16	2	19	17.1

FUENTE: CIAT, 1977; 1978; 1979; 1980.

En la Figura 5 se presentan los resultados de un estudio llevado a cabo con el fin de mejorar la sensibilidad de la determinación de P en fluoruro y ácido clorhídrico diluidos. Puede observarse que, al aumentar la concentración de NH_4F en la solución extractora, aumentan los valores del P disponible los cuales, a su vez, se reflejan en la respuesta de *Brachiaria decumbens* a la aplicación de fósforo. Como el NH_4F es capaz de extraer parte del fósforo ligado al aluminio y al hierro, estas fracciones pueden estar desempeñando una función importante en la liberación del P para las plantas.

El tercer componente en la estrategia para el manejo eficiente del P consiste en el uso de fuentes de fósforo menos costosas que las solubles, por ejemplo, rocas fosfóricas ya solas o ya en combinación con superfosfatos.

El cuarto componente consiste en el uso de cantidades moderadas de cal para aumentar la disponibilidad de fuentes solubles de P. Anteriormente se mencionó la influencia del encalamiento

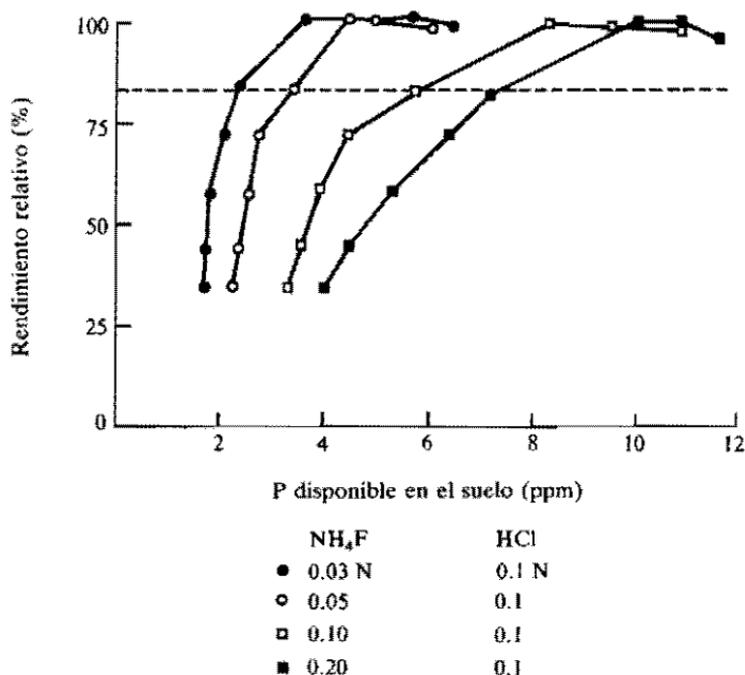


Figura 5. Diferentes niveles de P disponible, obtenidos mediante cuatro soluciones extractoras, y su relación con la producción de materia seca de *Brachiaria decumbens* en un Oxisol de Carimagua.

sobre la saturación y concentración de Al en el suelo y sobre los valores de pH del mismo. En la Figura 6 se observa la influencia que estos factores, combinados con el nivel de P, tienen sobre la producción de materia seca de plantas de yuca mantenidas en solución nutritiva. Concentraciones superiores a 3 ppm de Al en la solución ocasionan una reducción drástica en la producción a pesar de la presencia, en la solución, de 4 ppm de P; en cambio, en ausencia de Al, las plantas respondieron muy bien a los niveles de P.

Como quinto componente puede mencionarse la selección de especies y variedades que crezcan bien en condiciones de bajo fósforo aprovechable en el suelo.

Finalmente, y dentro de la estrategia global, se debe hacer énfasis en la exploración de las posibilidades prácticas de las asociaciones de micorrizas para aumentar la absorción de P por las plantas. En la Figura 7 puede observarse la importancia que tiene la infección con hongos de micorrizas para la producción de yuca y para la determinación del nivel crítico externo de P de esta especie. Las plantas inoculadas alcanzan el 95% del rendimiento máximo cuando el P extraíble es de 15 ppm, mientras que las plantas no inoculadas requieren un nivel de 190 ppm de P disponible para alcanzar el mismo rendimiento.

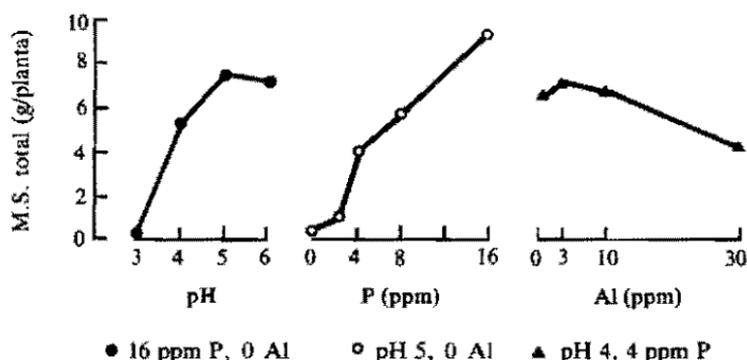


Figura 6. Efecto de la concentración de P y de Al y del pH de la solución nutritiva en la producción de materia seca de plantas de yuca de 35 días de edad.

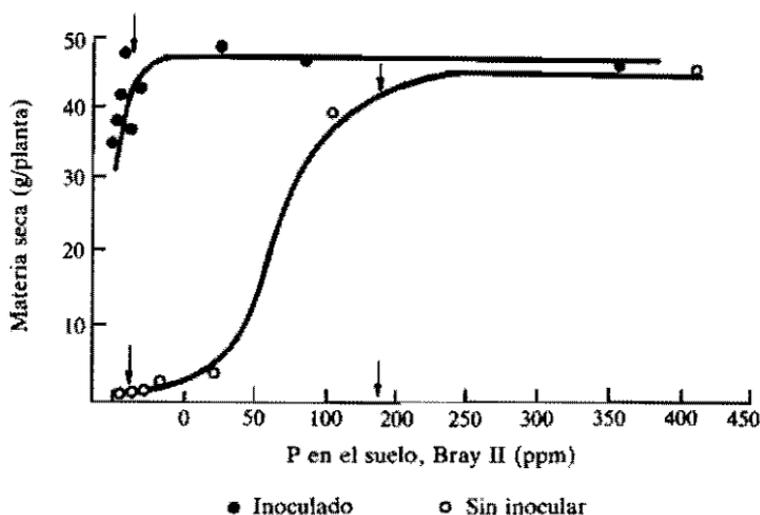


Figura 7. Relación entre la producción de materia seca del cultivar de yuca M Mex 59, inoculado y sin inocular con micorrizas, y el contenido de P del suelo después de la cosecha. La flecha indica los niveles críticos de P para una producción de 95% del máximo.

FUENTE: CIAT, 1980.

Resumen

En la interpretación de los resultados del análisis de suelos y en la recomendación de fertilizantes o enmiendas, debe tenerse en cuenta que el nivel crítico de un nutrimento separa los suelos con alta probabilidad de respuesta a su aplicación de los suelos en que esa probabilidad de respuesta es baja, pero no da información sobre la cantidad de fertilizante que debe aplicarse. La exactitud con que los datos del análisis de suelos puedan ser interpretados dependerá de la clase y calidad de los trabajos de investigación hechos en el campo, en los cuales se hayan basado las correlaciones de datos. Hechas estas precisiones, en los Cuadros 4, 5 y 6 se presentan los niveles críticos para los macro y micronutrientes del suelo, y los niveles críticos externos para el cultivo de la yuca y para el establecimiento de especies forrajeras en los suelos ácidos.

Cuadro 4. Métodos de análisis, factores del suelo que influyen en su interpretación, y rangos en el nivel crítico de los micronutrientes.

Elemento	Factores		Método*	Rango del nivel crítico
	Básico	Probable		
B	Textura pH	Cal	Agua caliente	0.1-0.7
Cu	-	M.O., Fe	- $\text{NH}_4\text{C}_2\text{H}_3\text{O}_2$ (pH 4.8) - 0.5MEDTA	0.2 0.8
Fe	pH	Cal	- $\text{NH}_4\text{C}_2\text{H}_3\text{O}_2$ (pH 4.8) - DTPA + CaCl_2 (pH 7.3)	2.0 2.5-4.5
Mn	pH	M.O.	- 0.05N HCl + 0.025N H_2SO_4 - H_2O	5.9 2.0
Zn	pH, Cal	P	- 0.1N HCl - EDTA + $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$ - DTPA + CaCl_2 (pH 7.3)	1.0-7.5 1.4-3.0 0.5-1.0

a. EDTA = ácido etiléndiamino tetraacético. DTPA = ácido dietiléntriamino pentacético.

Cuadro 5. Aproximación a los niveles críticos de nutrientes en el suelo para el cultivo de la yuca.

Nutriente	Método	Nivel
P	Bray I	7 ppm
	Bray II	10 ppm
	Olsen-EDTA	8 ppm
	Carolina del Norte	8 ppm
K	NH_4 -Acetato 1N	0.15 meq/100 g
	Carolina del Norte	60 ppm
Al	KCl 1N	2.5 meq/100 g
Sat. Al		75%
Ca	NH_4 -Acetato 1N	0.25 meq/100 g
Zn	Carolina del Norte	1.0 ppm
Mn	Carolina del Norte	5.0-7.0 ppm
B	Agua caliente	0.4-0.6 ppm
pH	Suelo:Agua = 1:1	4.6-7.0

Cuadro 6. Niveles aproximados de nutrientes y pH en los suelos ácidos para el establecimiento de especies forrajeras.

Nutriente	Método	Contenido		
		Bajo	Medio	Alto
P (ppm)	Bray II	<2	2-5	6-10
K (meq/100 g)	Bray II	<0.15	0.15-0.25	0.26-0.50
Al (meq/100 g)	KCl 1N	<0.5	0.5-1.0	1.1-1.5
Sat. Al (%)	(Calculada)	<10.0	10-40	41-70
Ca (meq/100 g)	KCl 1N	<0.4	0.4-1.5	1.6-4.0
Mg (meq/100 g)	KCl 1N	<0.2	0.2-0.8	0.9-1.2
S (ppm)		<10.0	10-15	16-20
Zn (ppm)	Carolina del Norte	<0.5	0.5-1.0	1.1-1.5
Cu (ppm)	Carolina del Norte	<0.5	0.5-1.0	1.1-2.0
B (ppm)	Agua caliente	<0.3	0.3-0.5	0.6-1.0
Mn (ppm)	KCl 1N	<20	20-50	51-80
		Muy ácido	Ácido	Neutro
pH del suelo	Suelo:Agua = 1:1	<4.5	4.5-5.5	4.6-7.0

FUENTE: Salinas, 1981.

Referencias

- Ayarza, M. A. y Salinas, J. C. 1982. Estudio comparativo de la tolerancia al aluminio de tres leguminosas forrajeras. *Suelos Ecuat.* 12(1):110-126.
- CIAT (Centro Internacional de Agricultura Tropical). 1978. Informe anual 1977. Cali, Colombia. p. A47-A76.
- . 1979. Informe anual 1978. Cali, Colombia. p. A1-A84.
- . 1980. Informe anual del Programa de Pastos Tropicales, 1979. Cali, Colombia. p. 63-95.
- . 1981. Informe anual del Programa de Pastos Tropicales, 1980. Cali, Colombia. p. 57-86.
- Cochrane, T. T.; Salinas, J. G. y Sánchez, P. A. 1980. An equation for liming acid mineral soils to compensate crop aluminum tolerance. *Trop. Agric.* 57(2):133-140.
- Melsted, S. W. y Peck, T. R. 1973. The principles of soil testing. En: Walsh, L. M. y Beatron, J. D. (eds.). *Soil testing and plant analysis.* Soil Science Society of America, Madison, WI, E.U. p. 13-20.

- Salinas, J. G. 1981. Necesidad de mejorar los procedimientos de evaluación del fósforo en la fertilidad de los suelos ácidos e infértiles de América tropical. Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), Cali, Colombia. 26 p.
- Sánchez, P. A. y Salinas, J. G. 1983. Suelos ácidos: Estrategias para su manejo con bajos insumos en América tropical. Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo, Bogotá, Colombia. 93 p.

RELACIONES SUELO-PLANTA

Estrategias para el Uso y Manejo de los Suelos Ácidos en América Tropical

*José G. Salinas y Carlos E. Castilla**

Características de los Ecosistemas de América Tropical

A un nivel amplio de caracterización regional, el trópico americano presenta dos ecosistemas predominantes: el de sabanas, que cubre alrededor de 360 millones de hectáreas, y el de bosques, con una extensión aproximada de 620 millones de hectáreas. En ambos ecosistemas predominan suelos que, en su mayoría (800 millones ha), son clasificados como Oxisoles y Ultisoles, de acuerdo con el sistema americano de taxonomía de suelos. La distribución de estos suelos en cada país revela la importancia de éstos en América del Sur, América Central y el Caribe (Cuadros 1 y 2).

En América tropical, la mayoría de los Oxisoles está confinada tanto en las regiones intertropicales y en superficies geológicas antiguas y estables, identificadas por los escudos continentales de Guyana y Brasil, como en la mitad oriental del valle del Amazonas, formado a partir de sedimentos fuertemente intemperizados provenientes de la erosión de los escudos continentales. A su vez, los Ultisoles predominan en el amplio valle sedimentario que ocupa la mitad occidental de la cuenca del Amazonas, formados a partir de sedimentos finos provenientes de la erosión de las elevaciones andinas; por consiguiente, ocupan superficies más recientes que los Oxisoles. También ocupan extensiones grandes en las partes más quebradas del escudo brasileño, que han sido afectadas por la erosión, y en algunas áreas de la cuenca del Orinoco (Salinas y Valencia, 1984).

América tropical, a nivel de diagnóstico para el uso y manejo de suelos ácidos, puede ser subdividida en dos regiones principales basadas en los sistemas agrícolas y en las limitantes del

* Científicos de suelos, Fertilidad de Suelos y Nutrición de Plantas, Programa de Pastos Tropicales, Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), Cali, Colombia.

Cuadro 1. Distribución de Oxisoles y Ultisoles, por país, en América del Sur.

País	Area ocupada (millones ha)	Proporción del país (%)	Importancia ^a
Brasil	572.71	68.0	+++
Colombia	67.45	57.0	+++
Bolivia	39.54	57.0	+++
Venezuela	51.64	58.0	+++
Perú	56.01	44.0	++
Paraguay	9.55	24.0	+
Ecuador	8.61	23.0	+
Chile	1.37	2.0	
Argentina	1.28	0.4	
Uruguay	0.00	0.0	

a. +++ Más de 50% del país.
 ++ Más de 25% del país.
 + Más de 10% del país.

FUENTE: Cochrane, 1979.

Cuadro 2. Distribución aproximada de Oxisoles y Ultisoles, por país, en América Central y el Caribe.

País	Area ocupada (millones ha)	Proporción del país (%)	Importancia ^a
Guayana Francesa	8.61	94.0	+++
Trinidad	0.42	84.0	+++
Surinam	11.43	62.0	+++
Panamá	12.25	62.0	+++
Guyana	3.59	63.0	+++
Jamaica	0.45	41.0	++
Nicaragua	3.92	30.0	++
Honduras	3.25	29.0	++
Cuba	2.42	21.0	+
Belice	0.40	18.0	+
Haití	0.52	18.0	+
Puerto Rico	0.16	18.0	+
Costa Rica	0.70	14.0	+
Guatemala	0.98	9.0	
República Dominicana	0.43	9.0	
El Salvador	0.00	0.0	

a. +++ Más de 50% del país.
 ++ Más de 25% del país.
 + Más de 10% del país.

FUENTE: Cochrane, 1979.

suelo (Sánchez y Cochrane, 1980). Cerca de un 30% de la América tropical (405 millones ha) está dominada por suelos con alto nivel de bases, relativamente fértiles, que sostiene poblaciones densas. El 70% restante está dominado por suelos ácidos de los órdenes Oxisoles y Ultisoles, con densidades de población relativamente bajas y la mayoría bajo vegetación de bosque y de sabana.

Las principales limitantes relacionadas con los suelos de América tropical y su región de suelos ácidos se presentan en el Cuadro 3, basadas en estimaciones preliminares. Las limitaciones más ampliamente difundidas en las regiones de Oxisoles y Ultisoles son más de naturaleza química que física; las más importantes son las deficiencias de fósforo y nitrógeno, y están además las de potasio, azufre, calcio, magnesio y zinc. Hay también toxicidades por aluminio o manganeso (o por ambos elementos) y una alta fijación de fósforo. Las limitaciones físicas del suelo más importantes son la baja capacidad de retención de agua disponible de muchos Oxisoles, y la susceptibilidad a la erosión y compactación —en la capa superficial del suelo— de muchos Ultisoles de textura arenosa. El riesgo de la formación de lateritas está presente en áreas menores, y la mayoría de las plintitas blandas se presentan en el subsuelo cuando la topografía es llana y no propensa a la erosión. En contraste, las limitantes

Cuadro 3. Principales limitaciones edáficas de América tropical (23°N a 23°S de latitud).

Limitación edáfica	Región de suelos ácidos e infértiles ^a	
	Área (millones ha)	Porcentaje área total (%)
Deficiencia		
N	969	93
P	1002	96
K	799	77
Ca, Mg	740	70
S	742	70
Zn	645	62
Cu	310	30
Otras		
Toxicidad por Al	756	72
Alta fijación de P	672	64

a. El área de esta región de suelos ácidos es aproximadamente 1043×10^6 ha.

FUENTE: Sánchez y Salinas, 1983.

del suelo más importantes de las regiones de suelos con altos niveles de bases en América tropical son el estrés por sequía, las deficiencias de nitrógeno, y los riesgos de erosión (Sánchez y Cochrane, 1980).

A pesar de la creencia, ampliamente difundida, de que los Oxisoles y Ultisoles no pueden sostener una agricultura intensiva y estable en los trópicos (McNeil, 1964; Goodland e Irwin, 1975), existe una amplia evidencia de que estos suelos pueden ser cultivados continuamente y trabajados intensivamente para desarrollar cultivos anuales (Sánchez, 1977; Marchetti y Machado, 1980), pastos, y cultivos perennes (Alvim, 1976). Este es también el caso de los Oxisoles y Ultisoles de Hawai y de los Ultisoles del suroriente de China, los cuales sostienen densas poblaciones.

Cuando las limitantes químicas del suelo se eliminan encañando y aplicando fertilizantes, las productividades de estos Oxisoles y Ultisoles se ubican entre las mayores del mundo. Por ejemplo, la Figura 1 muestra la producción anual de materia

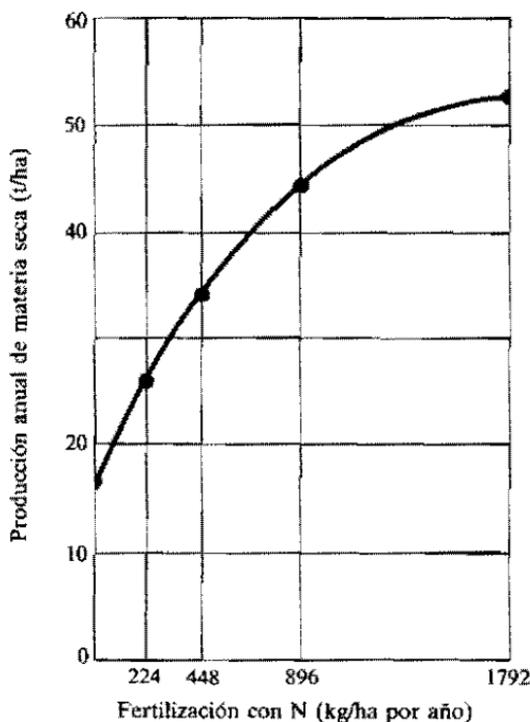


Figura 1. Producción anual de materia seca de *Pennisetum purpureum* cv. Napier de corte bajo, sometido a manejo intensivo en un Ultisol de las montañas húmedas de Puerto Rico.

FUENTE: Vicente-Chandler et al., 1974.

seca del pasto elefante (*Pennisetum purpureum*) con fertilización nitrogenada intensiva en Ultisoles de Puerto Rico y donde todas las limitantes de la fertilidad han sido eliminadas. Esta producción se aproxima al potencial máximo calculado por Dewitt (1967) para las latitudes tropicales de 60 t/ha al año de materia seca. En la Figura 2 se muestra otro ejemplo en que se obtuvieron excelentes producciones de maíz, del orden de 6.3 t/ha por cosecha, en un Oxisol arcilloso de Brasilia, Brasil, cuando su alto requerimiento de fósforo se suplió con una aplicación a voleo de 563 kg/ha de P y se corrigieron las otras limitantes químicas del suelo mediante encalamiento y fertilización.

Estas estrategias de manejo pueden ser muy beneficiosas cuando el mercado provee una relación favorable entre el precio de la cosecha y el costo del fertilizante. Siempre que las consideraciones de la infraestructura económica hagan rentable la estrategia de altos insumos, esta debería aplicarse vigorosamente. Sin embargo, en la mayoría de las regiones tropicales de suelos ácidos (Oxisoles y Ultisoles) no existen condiciones favorables de mercado.

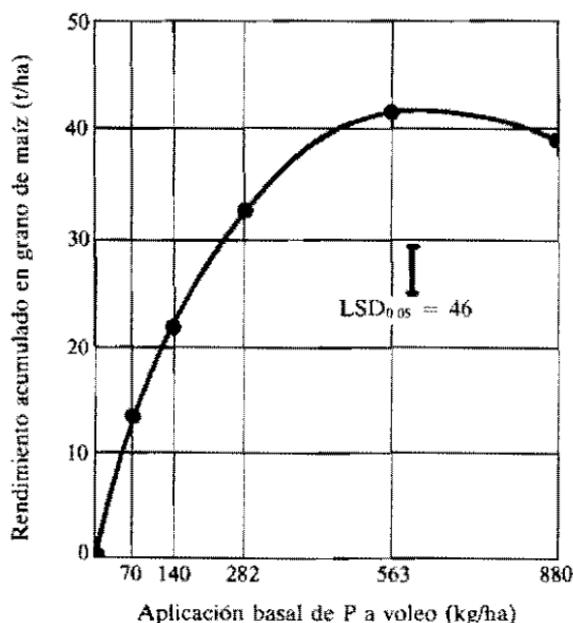


Figura 2. Respuesta del cultivo de maíz a las aplicaciones de fósforo en un Oxisol (*Haplustox Típico*) del Cerrado de Brasil; rendimiento acumulado en grano de seis cultivos consecutivos.

Producción de Alimentos en los Suelos Acidos del Trópico

De manera definitiva, parece que la competencia entre el crecimiento poblacional y la producción de alimentos llegará a definirse en los trópicos. Este hecho se ha relacionado principalmente con dos factores que insistentemente suponen la necesidad de producir más comida: el primero, la creciente población mundial, y el segundo, la mejora en el nivel de vida de las personas. Se estima que, para el año 2000, la población del mundo pueda alcanzar 6 mil millones de personas y, en consecuencia, la demanda de alimentos será tan elevada que se requiere cuanto antes una consideración seria sobre su producción.

A un nivel más amplio de generalización, existen tres vías esenciales para incrementar la producción de alimentos en el trópico: incrementando la producción por unidad de área en regiones actualmente cultivadas, expandiendo las tierras bajo riego, y abriendo nuevas tierras para cultivarlas. La primera y la última requieren de la disminución o eliminación de las limitantes del suelo, mientras que la segunda requiere disponibilidad de agua para resolver la limitante más importante. Bentley et al. (1980) examinaron estas tres alternativas y concluyeron que las tres eran necesarias, aunque la alternativa del riego estará limitada a áreas relativamente pequeñas y es la más costosa de las tres. Es poco discutible el hecho de que aumentar la productividad en tierras que están cultivadas es la vía principal para elevar la producción de alimentos. Sin embargo, los aumentos en rendimiento por unidad de área se lograrán únicamente en aquellas regiones que cuenten con infraestructura favorable para la intensificación de la agricultura y se introduzcan prácticas de manejo que interactúen para obtener un mayor rendimiento, eliminando en lo posible los riesgos de la producción.

Estimativos recientes de la FAO (Dudal, 1980) muestran que para mantener la producción de alimentos durante las próximas décadas, esta producción deberá incrementarse en un 60%, y deberán incorporarse alrededor de 200 millones de hectáreas a la agricultura actual. Este aumento de la extensión cultivada será posible, en gran parte, por el uso que se haga de los suelos ácidos del trópico, es decir, los Oxisoles y Ultisoles de las sabanas y selvas.

Estas extensas regiones poseen, en gran proporción, una topografía favorable para la agricultura, temperaturas adecuadas

para el crecimiento de las plantas durante todo el año, humedad suficiente durante el año en un 70% de la región y durante 6 a 9 meses en el 30% restante (Sánchez, 1977). Sin embargo, los principales factores limitativos que obstaculizan el desarrollo agrícola en estas áreas, aparte la baja fertilidad natural del suelo, son de tipo socioeconómico, a saber: el transporte limitado, la carencia de una infraestructura de mercado, y la baja densidad de población.

Típicamente, en la mayoría de las áreas tropicales se observa que las regiones que reciben la influencia de los mercados presentan precios de la tierra bastante elevados, que justifican en gran parte la intensificación de los sistemas agrícolas y pecuarios; esto se refleja a su vez en el uso de altos niveles de insumos. A medida que los centros de mercado quedan distantes de los centros de producción, se observa una gradiente en el uso de la tierra y en la intensificación de los sistemas de producción, los cuales llegan a ser de tipo extensivo más allá de la llamada 'frontera agrícola', y se caracterizan por una tecnología de bajo uso de insumos. Consecuentemente, el grado de intensidad del sistema agrícola o pecuario que se establecerá en una región tropical se decidirá en función de la localización de la región respecto al mercado, de la infraestructura de transporte existente, y de la disponibilidad de los insumos. En otras palabras, decidir sobre la aplicación de una tecnología de altos o bajos insumos debe fundarse en la viabilidad del sistema de producción.

Evaluación Comparativa de Tecnologías para el Uso y Manejo de los Suelos

Tecnología de altos insumos

La razón principal de la producción de alimentos a una tasa superior al crecimiento poblacional en los países en desarrollo, durante la década de 1965-1975, fue el mejoramiento genético y el uso de variedades de cultivos altamente rendidores en condiciones en que los factores agua y suelo no eran limitantes. Grandes avances se han logrado al aplicar esta tecnología a los sistemas agrícolas del trópico, que son un sinónimo de la 'revolución verde'. Sin embargo, ese impacto se recibió solamente en las áreas de suelos fértiles y con infraestructura existente que representan un 30% de América tropical.

Para los suelos ácidos, la aplicación de la tecnología de altos insumos o, en otras palabras, la 'producción de máximos rendimientos' según la concepción de Cooke (1982), implica eliminar los factores edáficos, climáticos y socioeconómicos que limitan la obtención del máximo rendimiento. Su concepto básico es el de cambiar el suelo para que se ajuste a las demandas nutricionales de la planta. Consecuentemente, la investigación sobre los rendimientos máximos se concentra en el estudio de una o más variables edafoclimáticas y en sus interacciones en un sistema multidisciplinario que estriba en la obtención del más alto rendimiento posible bajo una situación dada (Wagner et al., 1982). Por tanto, el objetivo de la tecnología de altos insumos es encontrar la mejor combinación de los niveles más altos de los insumos esenciales requeridos para maximizar la producción.

Este concepto es dinámico, debido a que los avances tecnológicos permiten que los altos rendimientos actuales continúen subiendo. De ahí que es necesario introducir el análisis económico para determinar el rendimiento máximo económico, el cual está generalmente por debajo del llamado rendimiento máximo (Potash and Phosphate Institute, 1983). Esta situación no debe desalentar al investigador en la búsqueda del rendimiento máximo, puesto que las condiciones económicas adversas del momento pueden ser superadas en el futuro mediante el avance tecnológico. En conclusión, la tecnología de máximos rendimientos basada en el suministro elevado de insumos es ampliamente responsable de los niveles actuales de producción de alimentos en el mundo, e indudablemente debe continuar donde las condiciones económicas lo permitan.

En el caso específico de los suelos ácidos del trópico americano, la tecnología tradicional de altos insumos, desde el punto de vista agronómico, es también válida. Si fuéramos agricultores en una región de Oxisoles o Ultisoles y se nos diera a escoger entre superar los principales factores edáficos limitativos mediante la financiación de aplicaciones masivas de fósforo, de suficiente cal y de sistemas suplementarios de riego, y la alternativa de no poner en práctica los componentes descritos, inmediatamente tomaríamos la alternativa de producir lo máximo y presenciaríamos la valorización de nuestra tierra al transformarse ésta de tierra marginal en tierra excelente por la aplicación de insumos.

Sin embargo, dichas oportunidades son la excepción en vez de la regla en las regiones marginales de suelos ácidos de América

tropical. La magnitud del capital que es necesario invertir para aplicar la tecnología de altos insumos a estos suelos va más allá de los recursos de la mayoría de los gobiernos y de las organizaciones privadas.

Tecnología de bajos insumos

El término 'tecnología de bajos insumos' presenta ciertas ambigüedades cuando define qué tan bajo es bajo y en comparación con qué. Los términos 'cero insumos' e 'insumos mínimos' también se han utilizado. El primero no es apropiado puesto que, en la mayoría de los sistemas, cero insumos resulta en cero producción. Bajos insumos, en contraposición a insumos intermedios o altos, merecen alguna cuantificación. Sánchez y Salinas (1983) sugieren que la tecnología de bajos insumos para los suelos ácidos del trópico es la necesaria para obtener aproximadamente un 80% de los rendimientos máximos del germoplasma vegetal tolerante a la acidez. Los mismos autores muestran que es biológicamente factible alcanzar niveles adecuados de rendimiento con la tecnología y el germoplasma disponibles, a un nivel de insumos considerablemente menor que el usado por la tecnología y el germoplasma tradicionales.

Los costos crecientes de los insumos relacionados con el petróleo y el énfasis mundial de conservar los recursos naturales de la tierra anteponen restricciones adicionales al enfoque de 'máximos insumos'. Las metas de desarrollo de muchos países tropicales requieren que tanto los productores como los consumidores de recursos limitados sean los principales beneficiarios de la tecnología agrícola mejorada. Nickel (1979) indicó que si los consumidores de bajos ingresos han de beneficiarse, los aumentos en la producción de alimentos se deben lograr a costos unitarios más bajos. Estos costos unitarios bajos se pueden alcanzar mediante tecnología que tenga una base biológica la cual, con frecuencia, es neutra respecto a la producción de escala. Para asegurar que los productores de bajos recursos tengan acceso a esta tecnología, ella no debe depender de grandes cantidades de insumos comprados.

En el pasado, los agricultores se ajustaron a su falta de poder adquisitivo aplicando cantidades bajas de insumos a un sistema agrícola diseñado para operar mejor a niveles altos de insumos. Ejemplos de éstos abundan en América Latina, en donde las deficiencias de nutrimentos son evidentes en muchos campos. Muchos agricultores saben que sus cultivos podrían dar mayores

rendimientos si se aplicaran fertilizantes a las variedades con alto potencial de rendimiento, pero no pueden comprar más o no se atreven a hacerlo debido al alto riesgo involucrado. Otro ejemplo es el intento de establecer, en gran escala, la producción de ganado de carne en Oxisoles y Ultisoles del Amazonas de Brasil mediante la siembra de *Panicum maximum* sin fertilización fosforada. Este es un claro ejemplo de la ignorancia de factores limitativos edáficos muy obvios. Como lo ha mencionado repetidamente Paulo Alvim en reuniones acerca del Amazonas, "la agricultura es diferente de la minería". Los agricultores deben adicionar fertilizantes con el fin de sostener la producción, inclusive en los mejores suelos de las regiones templadas.

La tecnología de manejo de suelos con bajos insumos para estos suelos ácidos es diferente de la adopción parcial de la tecnología de altos insumos. *La tecnología de bajos insumos no es asunto de aplicar menos o lo mismo sino una manera diferente de manejar el suelo.* El adelanto fundamental ha sido la identificación de especies y variedades importantes que pueden tolerar grados notables de factores limitativos impuestos por la acidez del suelo. Es pues cuestión de determinar la cantidad de fertilizante y de cal que estas especies tolerantes requieren para producir un 80% de su rendimiento máximo en forma sostenida.

En consecuencia, *la principal justificación de la tecnología de manejo de suelos con bajos insumos, en regiones de Oxisoles y Ultisoles de América tropical, es de naturaleza socioeconómica y no agronómica.*

Productividad de los sistemas de altos y bajos insumos

Los sistemas de manejo de suelos de altos insumos agronómicamente viables producen casi invariablemente rendimientos más altos que los sistemas de bajos insumos definidos aquí. Hay varias razones que responden a esta observación. Cuando se eliminan los factores edáficos limitativos mediante fertilización, enclavamiento y riego, se deben utilizar especies y variedades que presenten un rendimiento potencial absoluto mayor que el de las variedades tolerantes a la acidez, debido a que los atributos genéticos de estas especies o variedades, en rendimiento y calidad, fueron obtenidos originalmente en condiciones edafoclimáticas sin limitantes.

Por otra parte, la fertilidad de los suelos ácidos es relativa, puesto que la denominación que se le da de baja, media o alta

dependerá de la especie o variedad que se cultive. Por ello, un suelo marginal para la producción de maíz, sorgo o soya puede ser excelente para especies forrajeras perennes de gran potencial.

Se ha manifestado que las especies de plantas tolerantes a las limitaciones de los suelos ácidos, particularmente las tolerantes a niveles más bajos de fósforo aprovechable, pueden agotar completamente la baja reserva de nutrimentos que tienen estos suelos y dejarlos totalmente inútiles. La tecnología de bajos insumos se considera, a veces, como el esfuerzo final para extraer el último resto de fertilidad de estos suelos. Sin embargo, este argumento se debe analizar en términos de las reservas totales del suelo, de las cantidades de fertilizantes que se deben agregar, y de la extracción total de nutrimentos.

A causa del crecimiento continuo de las plantas, la disponibilidad de ciertos nutrimentos en el suelo disminuye eventualmente por debajo del nivel crítico. En Oxisoles y Ultisoles, esto ocurre relativamente rápido con el nitrógeno y el potasio, elementos que son muy móviles en su forma aprovechable. El agotamiento del nitrógeno es muy poco posible debido a la gran reserva en la fracción orgánica y a su reposición mediante descomposición radical, fijación de nitrógeno y otros factores agronómicos. Los contenidos de materia orgánica no son generalmente diferentes de los principales suelos de la zona templada (Sánchez, 1976). La situación con el azufre es similar. La tasa de agotamiento del potasio depende de la reserva que hay en el suelo de la forma no intercambiable del elemento, principalmente en los minerales de las arcillas. Las reservas de potasio de estos suelos comúnmente proporcionan menos que el nivel crítico generalmente aceptado de 0.15 meq/100 g; por consiguiente, se establece un equilibrio entre el potasio aprovechable (intercambiable) y el no intercambiable. Este nivel no logrará sostener un crecimiento rápido de las plantas pero no reducirá a cero las reservas de potasio en el suelo. Como los residuos de las cosechas o de las pasturas maduras presentan, en general, altos niveles de este elemento, usualmente ocurre el reciclaje de este nutrimento.

El potencial de extracción del calcio, magnesio, zinc, hierro, cobre, boro, manganeso y molibdeno parece menos factible, puesto que las cantidades removidas por las cosechas de los cultivos son muy pequeñas en comparación con las reservas totales de los suelos de Oxisoles y Ultisoles. Igualmente, las formas aprovechables de estos elementos son menos móviles en los suelos y, por consiguiente, están menos sujetas a pérdidas.

Finalmente, el contenido total de fósforo—elemento alrededor del cual se presenta la mayoría de las discusiones sobre el 'agotamiento del suelo'— en la capa superficial de Oxisoles y Ultisoles oscila entre 100 y 200 ppm de P, en comparación con el nivel de aproximadamente 300 ppm de P en suelos de arcillas de gran actividad con un alto nivel de bases propios de las regiones templadas (Sánchez, 1976). Sin embargo, algunos Oxisoles presentan contenidos muy altos de fósforo, tales como el Eustrtox del Cerrado de Brasil (Moura et al., 1971). A pesar de que la poca información disponible indica que la mayoría de los Oxisoles y Ultisoles presentan bajos niveles de fósforo, la extracción de este nutrimento por plantas adaptadas a suelos ácidos (enraizamiento profundo y uso eficiente del fósforo) resulta ser mínima, y con el reciclaje se produce una restauración lenta del fósforo. En consecuencia, el argumento del agotamiento del suelo parece tener poca validez.

Se han descrito en forma resumida diversos aspectos de las tecnologías de manejo de suelos que se pueden aplicar en los suelos ácidos de América tropical. Obviamente, cada componente no se puede aplicar a todas las situaciones o sistemas agrícolas en esta extensa área, puesto que algunos componentes son mutuamente excluyentes. Igualmente, hay varios componentes que se encuentran razonablemente bien desarrollados y listos para la validación local, en tanto que otros son apenas observaciones preliminares. Sin embargo, globalmente representan la filosofía del manejo de suelos en el trópico.

Debe enfatizarse que, prescindiendo de la tecnología empleada, el manejo de la fertilidad del suelo ácido debe contemplar necesariamente tres componentes: el requerimiento nutricional de la planta, las propiedades físico-químicas del suelo, y los procesos biológicos del suelo.

Necesidades de Investigación

En los puntos anteriores se ha mostrado la factibilidad del enfoque de tecnologías de altos y bajos insumos presentando varios componentes de las dos tecnologías de manejo de los suelos ácidos de América tropical. Las instituciones de investigación responsables del desarrollo de sistemas agrícolas y pecuarios para suelos representativos deben ser las que integren los componentes adecuados para una situación dada en diferentes sistemas agrícolas. Por consiguiente, la primera prioridad de investigación, en la mayoría de las situaciones, será la de desarrollar

totalmente los componentes de esas tecnologías para un sistema agrícola o pecuario en particular. Este trabajo ha identificado varias brechas importantes en la investigación, de las cuales una lista parcial se resume a continuación:

1. Caracterizar especies y variedades promisorias de cultivos anuales, de pastos y de cultivos perennes por su tolerancia a las distintas limitaciones del suelo en términos de niveles críticos cuantitativos.
2. Caracterizar niveles críticos mediante pruebas analíticas de suelos para las deficiencias de nutrimentos (o las toxicidades) en los principales tipos de suelos empleando especies y variedades adaptadas a los sistemas agrícolas y pecuarios.
3. Desarrollar medios para interpretar los sistemas de evaluación de tierras en términos de los requerimientos de la tecnología de altos o bajos insumos.
4. Estudiar los cambios que se producen, con el tiempo, en las propiedades del suelo tanto químicas como físicas, y en las principales situaciones de los sistemas edáficos y agrícolas. Estos estudios permitirán predecir cambios en la dinámica de los nutrimentos o en el deterioro físico del suelo y corregirlos antes de que ocurran. La información sobre la dinámica del suelo es escasa y generalmente refleja un período de tiempo muy corto. También se requieren estudios a largo plazo para observar los cambios en las propiedades del suelo, a fin de comprender mejor lo que ocurre en suelos manejados mediante sistemas de bajos insumos. Los interrogantes acerca del grado de reciclaje de nutrimentos, la cantidad de nitrógeno residual de sistemas de cultivo (incluyendo los de leguminosas), y la eficiencia del uso de fertilizantes podrían ser respondidos mediante estos estudios a largo plazo sobre las propiedades del suelo y sus relaciones con la producción de plantas.
5. Cuantificar los sistemas de agrosilvicultura. Es necesario establecer una base de datos sobre sistemas agrícolas que incluyan especies forestales solas o en combinación con cultivos anuales y pasturas.
6. Investigar la manera de aumentar la fertilidad del subsuelo. Se requiere una mayor comprensión básica de la química del movimiento del calcio y del magnesio, como también

de otros factores que alivian la toxicidad del aluminio en el subsuelo por medio de la lixiviación.

7. Comprender mejor la tolerancia a los bajos niveles de fósforo aprovechable. Las teorías y los estudios de invernadero sobre la capacidad diferencial de las plantas para acidificar su rizosfera se deben probar y validar en las condiciones de los Oxisoles y Ultisoles.
8. Reunir en un solo paquete de investigación y validación los distintos componentes de la tecnología de manejo del fósforo. Es posible combinar, para sistemas específicos de suelos y agricultura, las mejores fuentes, dosis y métodos de aplicación y su interacción con variedades tolerantes a bajos niveles de fósforo aprovechable, la inoculación con *Rhizobium*, y la inoculación potencial con cepas mejoradas para establecer micorrizas. Es necesario desarrollar fuentes de fertilización de fósforo mejoradas o menos costosas, en función de la intensidad del sistema de producción.
9. Adaptar especies o variedades de leguminosas tolerantes a la acidez del suelo a ciertas cepas de *Rhizobium*, con el fin de hacer que ambas sean compatibles, en un mismo grado, con las limitaciones impuestas por la acidez del suelo y para favorecer la persistencia del *Rhizobium* en el suelo.
10. Desarrollar nuevos métodos para mejorar la eficiencia de la fertilización nitrogenada en cultivos que no sean leguminosas, y de la fertilización potásica en todos los cultivos. La baja recuperación de los fertilizantes nitrogenados y potásicos es un obstáculo considerable que no permite disminuir los costos unitarios. Es necesario desarrollar fuentes alternas de fertilización potásica con productos de menor solubilidad.

Referencias

- Alvim, P. T. 1976. El equilibrio entre la conservación y la utilización de los trópicos húmedos. *Desarrollo Rural* 8:187-194.
- Bentley, C. F.; Holowaychuck, H.; Leskiw, L. y Toogood, J. A. 1980. En: Bonn Conference on Agricultural Production Report. Rockefeller Foundation, Nueva York, E.U.

- Cochrane, T. T. 1979. An ongoing appraisal of the savanna ecosystems of Tropical America for beef cattle production. En: Sánchez, P. A. y Tergas, L. E. (eds.). Producción de pastos en los suelos ácidos de los trópicos. Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), Cali, Colombia. p. 1-14.
- Cooke, G. W. 1982. Fertilizing for maximum yield. McMillan, Nueva York, E.U. 465 p.
- De Witt, C. T. 1967. Photosynthesis: its relationship to overpopulation. En: San Pietro, A; Greer, F. A. y Army, T. J. (eds.). Harvesting the sun. Academic Press, Nueva York, E.U. p. 315-320.
- Dudal, R. 1980. Soil-related constraints to agricultural development in the tropics. En: Priorities for alleviating soil related constraints to food production in the tropics. International Rice Research Institute (IRRI), Los Baños, Filipinas. p. 23-37.
- Goodland, R. J. A. y Irwin, H. S. 1975. Amazon jungle: green hell to red desert? Elsevier, Amsterdam, The Netherlands. 155 p.
- Marchetti, D. y Machado, A. D. (eds.). 1980. Cerrado: uso e manejo. Editerra, Brasilia, Brasil. 760 p.
- McNeil, M. 1964. Lateritic soils. *Sci. Am.* 211:96-102.
- Moura, W.; Buol, S. W. y Kamprath, E. J. 1972. *Experientiae (Brazil)* 13:235-247.
- NCSU (North Carolina State University). 1978. Agronomic-economic research on tropical soils: Annual report for 1976-77. North Carolina State Univ., Raleigh, NC, E.U.
- Nickel, J. L. 1979. Foreword. En: CIAT highlights for 1978. Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), Cali, Colombia. p. viii.
- Potash and Phosphate Institute. 1983. Maximum economic yield manual: A guide to profitable crop production. Atlanta, GA, E.U.
- Salinas, J. G. y Valencia, C. A. 1984. Oxisoles y Ultisoles en América tropical. Guía de estudio. Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), Cali, Colombia. p. 53 y p. 68.
- Sánchez, P. A. 1976. Properties and management of soils in the tropics. Wiley, Nueva York, E.U.
- . 1977. Advances in the management of Oxisols and Ultisols in tropical South America. En: Proceedings of the international seminar on soil environment and fertility management in intensive agriculture. Soc. Sci. Soil and Manure, Tokio, Japón. p. 535-566.

- y Cochrane, T. T. 1980. Soil constraints in relation to major farming systems of tropical America. En: Properties for alleviating soil-related constraints to food production in the tropics. International Rice Research Institute (IRRI), Los Baños, Filipinas. p. 107-140.
- y Salinas, J. G. 1983. Suelos ácidos: Estrategias para su manejo con bajos insumos en América tropical. Montoya y Araújo, Bogotá, Colombia. 93 p.
- Vicente-Chandler, J.; Abruna, F.; Caro-Costas, R.; Figarella, J.; Silva, S. y Person, R. W. 1974. Intensive grasslands management in the humid tropics of Puerto Rico. Univ. P.R. Agric. Exp. Sta. Bull. 223.
- Wagner, R. E.; Dibb, D. W.; Usherwood, N. R. y Yamada, T. 1982. Building maximum economic yield systems for Brazil. En: Sixth Symposium on Cerrados, Brasil.

Una Nueva Metodología para Seleccionar Cultivares Tolerantes al Aluminio y con Alto Potencial de Rendimiento

*J. J. Nicolaidis, III y M. I. Pihá**

Introducción

Los años recientes han visto un interés creciente en la evaluación de varios cultivos por su tolerancia al aluminio de los suelos. Este interés es más grande en los países desarrollados donde las presiones de población han forzado a la agricultura a ocupar los suelos ácidos o marginales. Muchas veces las tecnologías mejoradas, como las variedades de la 'revolución verde', no sirven para la producción agrícola en estos suelos si no se hacen aplicaciones de cal, la cual, muchas veces, no está disponible para los agricultores por razones de ubicación, transporte o economía. Entonces, lo que necesitan los agricultores en estos suelos ácidos es una 'revolución adaptable' en que variedades o líneas mejoradas puedan ser identificadas como adaptadas a suelos ácidos para su uso inmediato o para emplearlas en programas de mejoramiento.

Hay algunos trabajos en la literatura sobre evaluación de variedades de varios cultivos por su tolerancia a la acidez o a la toxicidad causadas por el Al en el laboratorio, en el invernadero o en el campo, y a veces combinando algunos de estos aspectos. En algunos de estos trabajos, los autores querían evaluar varios cultivares por su tolerancia a la toxicidad del Al. Sin embargo, no había un método bueno para evaluar cultivares

* El autor principal fue profesor asociado y coordinador del Programa de Investigación de Suelos Tropicales del Departamento de Ciencias del Suelo, en la Universidad Estatal de Carolina del Norte, y ahora es decano asociado de Agricultura, director de Agricultura Internacional, y vicescanciller asistente para investigación en la Universidad de Illinois, en Urbana, IL, E.U.; el segundo autor fue asistente de investigación ubicado en Yurimaguas, Perú, con el Programa mencionado y ahora es candidato doctoral en la Universidad de California, Davis, CA, E.U.

con tolerancia a un alto porcentaje de saturación de Al y, a la vez, con alto potencial de rendimiento bajo estas condiciones de Al tóxico en el suelo. Se ha desarrollado ya un método que sirve para realizar este objetivo.

Métodos y Materiales

El trabajo resumido en este capítulo fue realizado por los autores (Piha y Nicholaides, 1983) en un suelo Paleudult típico, franco de textura fina, silíceo e isohipertérmico, cerca de Yurimaguas, Perú, en la Estación Experimental Agrícola peruana en que funcionaba el Programa de Investigación de Suelos Tropicales, entre 1979 y 1982. Más detalles de varios experimentos hechos con arroz, batata, soya, maní y caupí pueden encontrarse en el Informe Técnico de 1980-1981 del Programa de Investigación de Suelos Tropicales (Piha y Nicholaides, 1983).

Modelo

Para evaluar los datos de muchos cultivares de una especie vegetal por su tolerancia a la toxicidad de Al y por su potencial de alto rendimiento bajo estas condiciones tóxicas de Al en el suelo, hay que construir primero una gráfica (Figura 1), en la cual el rendimiento absoluto en condiciones de Al tóxico es la abscisa (eje de X) y el rendimiento con toxicidad de Al—relativo al obtenido sin toxicidad de Al— es la ordenada (eje Y). Segundo, hay que dividir la figura en dos áreas construyendo una línea horizontal en el 85% del rendimiento relativo para separar los cultivares tolerantes (arriba de la línea) de los sensitivos (debajo de la línea). Varias veces en la literatura se usa el 80% del rendimiento relativo para evaluar la tolerancia al Al; en este caso, decidimos usar un criterio más estricto y por eso elegimos el 85%.

Ahora, para separar los cultivares cuyo potencial de rendimiento es alto de aquéllos en que éste es bajo, se ha construido una línea abscisa usando el rendimiento promedio del mejor tercio de los cultivares del ensayo en que se aplicó cal —o sea, sin toxicidad de Al— para estar ciertos de que se obtuvo un buen rendimiento. También se pueden utilizar otros criterios para determinar la ubicación de la línea vertical, aunque este método siempre da una indicación exacta del buen rendimiento de un cultivo bajo las condiciones actuales del ensayo.

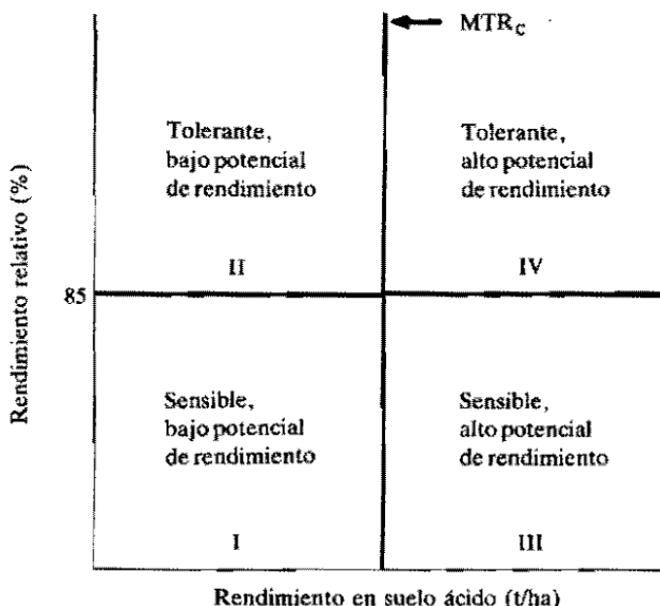


Figura 1. Modelo para diferenciar cultivares según su tolerancia a la toxicidad por Al y su potencial de alto rendimiento bajo estas condiciones de estrés. $Rendimiento\ relativo = (Rendimiento\ sin\ encalar) / (Rendimiento\ aplicando\ cal)$; MTR_c es el promedio del rendimiento del mejor tercio de los cultivares en el ensayo que recibió cal.

Hay pues cuatro áreas o cuadrantes en la gráfica. Las variedades que caen en el cuadrante IV son las tolerantes a la toxicidad del Al y las que tienen también un alto potencial de rendimiento bajo estas condiciones tóxicas. Los cultivares que caen en el cuadrante I no tienen tolerancia al Al ni alto potencial de rendimiento. Los cultivares del cuadrante II poseen tolerancia al Al y los del cuadrante III tienen alto potencial de rendimiento bajo toxicidad de Al (pero casi nunca cae un cultivar en el cuadrante III).

Entre 1979 y 1982, en un campo cerca de Yurimaguas, Perú, se evaluaron cultivares y líneas mejoradas escogidas, aplicando el modelo descrito, por su tolerancia al Al y por su alto potencial de rendimiento bajo estas condiciones tóxicas; esas variedades y líneas fueron 52 de arroz, 20 de batata, 22 de soya, 11 de maní, y 27 (ensayo 1) más 10 (ensayo 2) de caupí. Algunas propiedades de los suelos de los ensayos se presentan en el Cuadro 1. Cada ensayo tenía una condición tóxica de Al comparada con una condición sin toxicidad de Al (por encalado). Ni P ni cualquier otro elemento esencial era deficiente en el suelo porque se aplicaron suficientes cantidades de todos los elementos que el análisis de suelos consideró deficientes.

Cuadro 1. Algunas propiedades del suelo en los ensayos de evaluación de la tolerancia al aluminio de variedades y líneas de mejoramiento de arroz, batata, soya, maní y caupí, cerca de Yurimaguas, Perú.

Cultivo	Condición del suelo	pH	Al	CIC	Sat. de Al (%)	P ^a (ppm)
			----- (meq/100 cc)			
Arroz	Acido	4.2	4.0	5.1	78	17
	Encalado	4.9	1.7	5.4	31	19
Batata	Acido	4.3	2.0	3.0	67	12
	Encalado	4.9	1.1	3.2	34	13
Soya	Acido	4.3	1.8	2.7	67	11
	Encalado	5.3	0.2	2.9	7	25
Maní	Acido	4.2	4.7	5.7	82	10
	Encalado	4.9	1.9	5.4	35	10
Caupí (ensayo 1)	Acido	4.2	1.2	1.9	63	13
	Encalado	5.1	1.0	3.6	28	25
Caupí (ensayo 2)	Acido	4.2	3.6	5.1	71	12
	Encalado	5.0	1.2	4.9	24	11

a. Olsen modificado.

Resultados y Discusión

Arroz

De las 52 variedades evaluadas, 20 no rindieron nada por un ataque de piricularia; las otras mostraron diversos grados de resistencia. Usando el método nuevo para evaluar las 32 líneas restantes, encontramos que tres (Colombia 1, IR 9671-01141-5 y Suakoko 8) cayeron en el cuadrante IV, que indica tolerancia a la toxicidad de Al y un alto potencial de rendimiento bajo esas condiciones tóxicas (Figura 2). El cultivar CICA 8 casi entró en el cuadrante IV, pero su rendimiento relativo de 77% lo situó en el cuadrante III; no obstante, su producción de 3.25 t/ha en un suelo con 78% de saturación de Al se estimó muy buena. Los datos del rendimiento de algunas variedades y líneas seleccionadas están en el Cuadro 2. Hay, por lo menos, dos variedades, Colombia 1 y Suakoko 8, que tienen las dos características deseadas de tolerancia al Al y de alto potencial de rendimiento.

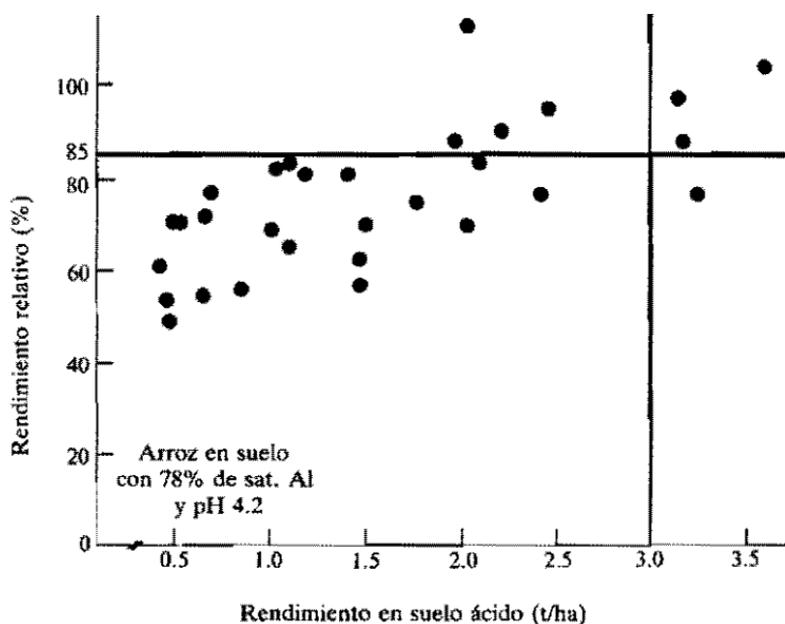


Figura 2. El modelo usado para indicar cultivares de arroz tolerantes al Al y con alto potencial de rendimiento bajo estrés por toxicidad de Al.

Cuadro 2. Algunas medidas de la producción de variedades y líneas de arroz seleccionadas en suelos con 78% y 31% de saturación de aluminio, cerca de Yurimaguas, Perú.

Variedad o línea	Rendimiento* (t/ha)		Rendimiento relativo de grano (%)	Peso relativo de materia verde (%)
	Suelo ácido	Suelo encalado		
IR 4422-62	2.03	1.81	113	103
Colombia 1	3.57	3.48	104	97
Suakoko 8	3.14	3.21	97	95
IR 4-2 ^b	2.42	3.14	77	86
CICA 8	3.25	4.19	77	84
Tox 494	2.03	3.04	70	80
Carolino ^b	1.48	2.43	62	58
INTI	0.34	1.97	18	43

a. Índice de ataque de *Pyricularia* a la hoja: \bar{X} para suelo ácido = 3.0; \bar{X} para suelo encalado = 2.2.

b. Variedades locales.

Batata

Las 20 líneas de batata evaluadas crearon un amplio rango en la gráfica (Figura 3), pero ninguna cayó en el cuadrante IV. Algunas variedades, como Modelo 2, tenían un rendimiento relativo bueno (97%), pero su rendimiento absoluto (Cuadro 3) bajo condiciones tóxicas de Al no fue mejor que el promedio del mejor tercio de las variedades ensayadas sin toxicidad de Al. Por tanto, de las variedades y líneas evaluadas ninguna fue, a la vez, tolerante y con un alto potencial de rendimiento, según el modelo.

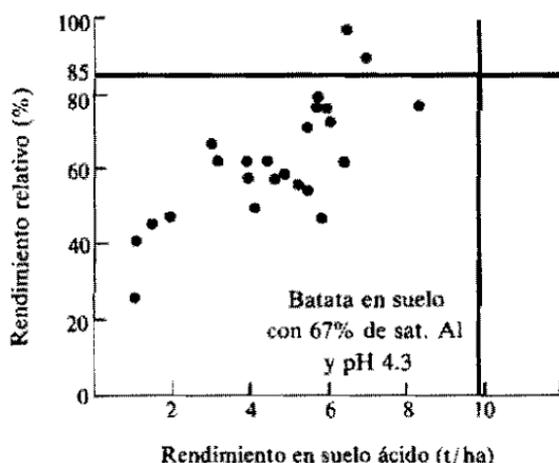


Figura 3. El modelo usado para indicar cultivares de batata tolerantes al Al y con alto potencial de rendimiento bajo estrés por toxicidad de Al.

Cuadro 3. Algunas medidas de la producción de líneas de batata escogidas, en suelos con 67% y 34% de saturación de aluminio, cerca de Yurimaguas, Perú.

Línea (nombre y código)	Peso seco (t/ha)		Rendimiento relativo de batata (%)	Peso relativo de la vegetación a la cosecha (%)	Índice de cosecha relativo (%)
	Suelo ácido	Suelo enclavado			
Modelo-2 (Y-19)	6.6	6.7	97	111	100
Tambor (Y-26)	8.4	11.0	77	80	98
Navarro (Y-18)	6.0	7.9	76	123	62
— (Y-06)	4.0	7.1	57	128	48
Modelo-1 (Y-20)	5.9	12.6	47	80	58
— (Y-23) ^a	0.1	2.2	7	59	8

a. Línea peruana; las demás son del IITA.

Soya

Este cultivo tenía más susceptibilidad a la toxicidad de Al que cualquier otro evaluado (Figura 4). El mejor rendimiento relativo fue solamente de 58% (Cuadro 4). Usando el método de Piha y Nicholaidis (Gill, 1983), ninguna variedad de soya entró en el cuadrante IV, en un ensayo hecho en Carolina del Norte. El Dr. Tony Juo del IITA dice que este instituto ya tiene líneas de soya que son tolerantes al Al. La evaluación de estas nuevas líneas con algunas que no sean tolerantes a la toxicidad de aluminio empleando el método propuesto, será un trabajo interesante.

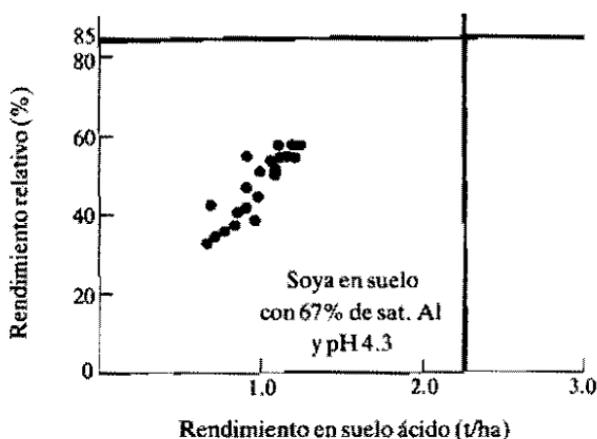


Figura 4. El modelo usado para indicar cultivares de soya tolerantes al Al y con alto potencial de rendimiento bajo estrés por toxicidad de Al.

Cuadro 4. Algunas medidas de la producción de variedades de soya escogidas en suelos con 67% y 7% de saturación de aluminio, cerca de Yurimaguas, Perú.

Variedad	Rendimiento ^a (t/ha)		Rendimiento relativo de grano (%)	Altura relativa (%)	Número relativo de vainas (%)
	Suelo ácido	Suelo encalado			
Hardee	1.23	2.13	58	74	75
SJ-2	1.20	2.07	58	72	70
Mineira	0.93	1.70	55	91	70
Júpiter ^b	0.93	2.23	42	72	90
Pelican mejorada	0.76	2.20	35	82	52

a. Días a la primera cosecha: \bar{X} en suelo ácido = 84; \bar{X} en suelo encalado = 89.
b. Variedad local.

Maní

La evaluación del maní fue muy interesante porque aunque, no entró ninguna variedad ni línea en el cuadrante IV que indica tolerancia y alto potencial de rendimiento (Figura 5), una línea mejorada (UF 78307) traída por el Dr. Al Norden de la Universidad de Florida rindió más de 2 t/ha (Cuadro 5) en condiciones muy tóxicas de Al (82% de saturación de Al). Esta línea ha sido usada en programas de mejoramiento en Carolina del Norte y en Perú y su progenie también ha demostrado tolerancia al Al (Katz, 1983). La evaluación de las líneas F₂ y F₃ continúa.

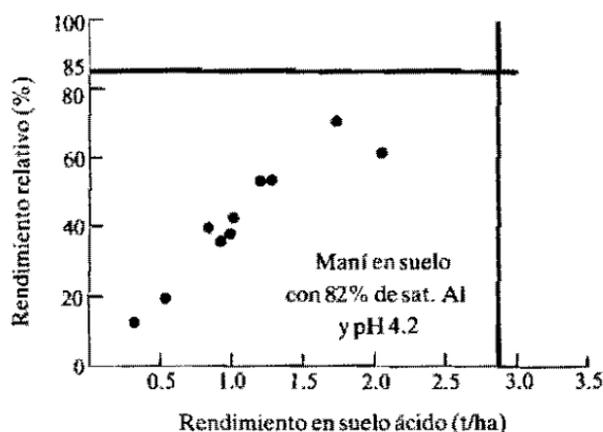


Figura 5. El modelo usado para indicar cultivares de maní tolerantes al Al y con alto potencial de rendimiento bajo estrés por toxicidad de Al.

Cuadro 5. Algunas medidas de la producción de variedades y líneas de maní escogidas, en suelos con 82% y 35% de saturación de aluminio, cerca de Yurimaguas, Perú.

Variedad o línea	Rendimiento de grano en cáscara (t/ha)		Rendimiento relativo de grano	Porcentaje relativo de cáscaras	Peso relativo de materia verde
	Suelo ácido	Suelo encalado	(%)	(%)	(%)
UF78305	1.75	2.48	71	95	62
UF78307	2.08	3.37	62	97	63
Florigiant	1.27	2.34	54	90	63
Tifrun	1.02	2.38	43	90	55
Blanco Tarapoto ^a	0.55	2.69	20	54	126
NC6	0.31	2.30	13	57	108

a. Variedad local.

Caupí

El primer ensayo con caupí no tenía aparentemente suficiente porcentaje de saturación de Al (63%) para crear un estrés adecuado; por ello, la mayoría de las variedades y líneas cayó en el cuadrante IV (Figura 6). De las 27 variedades y líneas evaluadas, 8 (todas del IITA) rindieron más de 2 t/ha en suelos con 63% de saturación de Al. Algunos ejemplos aparecen en el Cuadro 6.

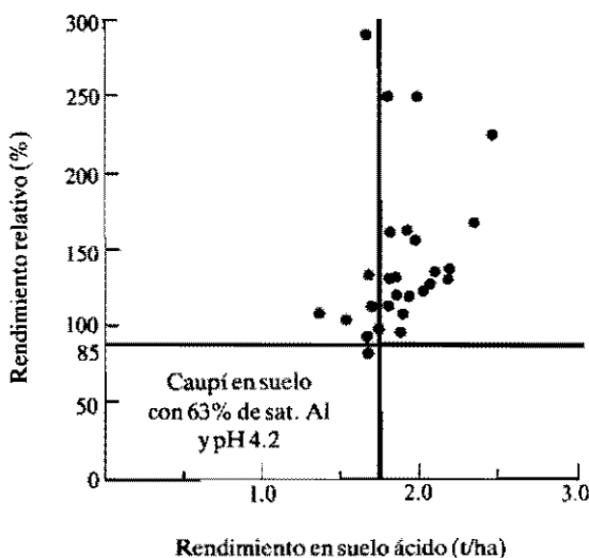


Figura 6. El modelo usado para indicar cultivares de caupí (ensayo 1) tolerantes al Al y con alto potencial de rendimiento bajo estrés por toxicidad de Al.

Por falta de un rango bueno para el caupí, otro ensayo fue iniciado en un suelo con mayor porcentaje de saturación de Al (71%), y se obtuvo un rango mejor. Aunque ninguna variedad o línea entró en el cuadrante IV, TVX 1836-013J del IITA casi entró en él. Los resultados de los ensayos 1 y 2 con caupí (Cuadros 6 y 7; Figuras 6 y 7) dan énfasis al hecho de que el término 'tolerante al Al' es solamente relativo, y que su definición depende muchísimo de las condiciones en que se hace la evaluación. La línea tolerante a 63% de saturación de Al no es necesariamente tolerante a 71% de esa saturación.

Cuadro 6. Algunas medidas de la producción de variedades y líneas de caupí escogidas, en suelos con 63% y 28% de saturación de aluminio (ensayo 1), cerca de Yurimaguas, Perú.

Variedad o línea	Rendimiento* (t/ha)		Rendimiento relativo de grano (%)	Altura relativa (%)	Número relativo de vainas (%)
	Suelo ácido	Suelo encalado			
TVX 2394-01F	1.68	0.58	290	79	318
3 Mesino ^b	1.79	0.72	250	95	250
TVX 66-2H	2.47	1.09	226	101	261
TVX 1999-01F	2.38	1.43	166	99	162
Blackeye 5	1.75	1.90	92	97	88
Vita 5	1.72	2.04	84	91	91

a. Días a la primera cosecha: \bar{X} en suelos ácidos = 66; \bar{X} en suelos encalados = 68.

b. Variedad local.

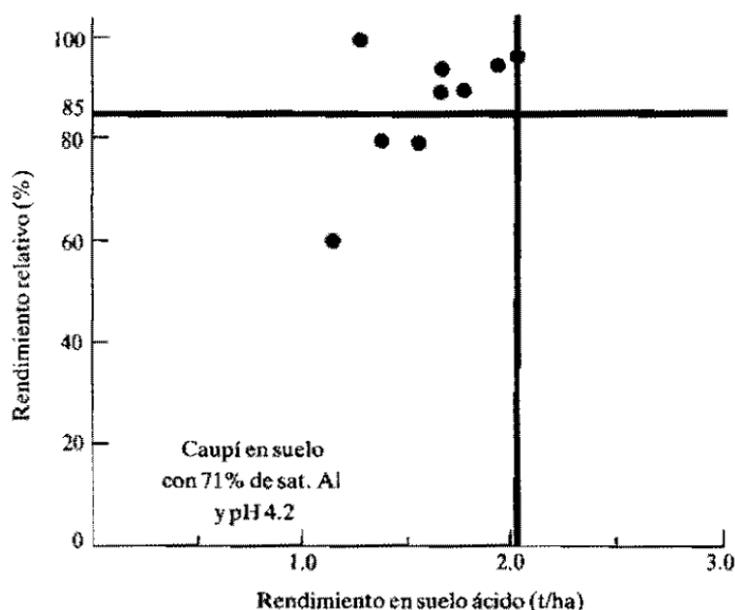


Figura 7. El modelo usado para indicar cultivares de caupí (ensayo 2) tolerantes al Al y con alto potencial de rendimiento bajo estrés por toxicidad de Al.

Sin embargo, parece que el caupí, como especie, tiene una tolerancia general a la toxicidad por Al. En ambos ensayos, el Vita 4 (del IITA) rindió más de 2 t/ha y dio 99% de rendimiento relativo. Los cultivares Vita 8, 6 y 7 rindieron más de 1.7 t/ha y dieron 85% de rendimiento relativo. Parece que ya existen variedades de caupí adaptadas a suelos con alto porcentaje de saturación de Al y que pueden rendir bien bajo esas condiciones.

Cuadro 7. Algunas medidas de la producción de variedades y líneas de caupí escogidas, en suelos con 71% y 24% de saturación de aluminio (ensayo 2), cerca de Yurimaguas, Perú.

Variedad o línea	Rendimiento (t/ha)		Rendimiento relativo de grano (%)	Altura relativa (%)	Número relativo de vainas (%)
	Suelo ácido	Suelo encalado			
TVX 1836-013J	1.30	1.32	99	74	100
Vita 4	2.05	2.12	96	76	94
TVX 1193-70	1.91	2.01	95	75	86
TVX 66-2H	1.80	2.03	90	81	89
2 Mesino ^a	1.68	1.94	87	79	89
Vita 5	1.16	1.94	60	56	59

a. Variedad local.

Resumen y Conclusiones

El método propuesto sirve bien para evaluar varios cultivares por su tolerancia al alto porcentaje de Al y, a la vez, por su alto potencial de rendimiento bajo estas condiciones tóxicas de Al. Se puede adaptar este método para evaluar cierto número de cultivares por su tolerancia a cualquier condición de estrés. La frase 'tolerante al Al' es relativa y su definición depende de las condiciones de la evaluación.

Se propone un nuevo método para evaluar un gran número de cultivares de cualquier especie vegetal por su tolerancia a cualquier estrés de suelo, incluyendo la toxicidad por aluminio. El método se usó para diferenciar la tolerancia a la toxicidad del aluminio en 52 cultivares de arroz, 20 de batata, 22 de soya, 11 de maní y 27 de caupí en experimentos de campo hechos en Yurimaguas, Perú, entre 1979 y 1982. Algunas variedades de arroz y caupí fueron identificadas, mediante el nuevo método, no sólo como tolerantes al Al, sino con un alto potencial de rendimiento bajo condiciones de toxicidad de Al en el suelo.

Referencias

- Armiger, W. H.; Foy, C. D.; Fleming, A. L. y Caldwell, B. E. 1968. Differential tolerance of soybean varieties to an acid soil high in exchangeable aluminum. *Agron. J.* 60:67-70.
- Brinkman, G. S. y Judy, W. H. 1979. The effects of soil aluminum on soybean productivity, nutrient composition, and nodulation using two soybean varieties under a field setting. *Agron. Abs.* 1979:42.

- Clark, R. B. 1977. Effect of aluminum on growth and mineral elements of Al-tolerant and Al-intolerant corn. *Plant Soil* 47:653-662.
- Fleming, A. L. y Foy, C. D. 1968. Root structure reflects differential aluminum tolerance in wheat varieties. *Agron. J.* 60:172-176.
- Foy, C. D.; Armiger, W. H.; Briggles, L. W. y Reid, D. A. 1965. Differential aluminum tolerance of wheat and barley varieties in acid soils. *Agron. J.* 57:413-417.
- ; Burns, G. R.; Brown, J. C. y Fleming, A. L. 1965. Differential aluminum tolerance of two wheat varieties associated with plant-induced pH changes around their roots. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 29:64-67.
- ; Fleming, A. L. y Armiger, W. H. 1969. Aluminum tolerance of soybean varieties in relation to calcium nutrition. *Agron. J.* 61:505-511.
- ; ———; Burns, G. R. y Armiger, W. H. 1967. Characterization of differential aluminum tolerance among varieties of wheat and barley. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 31:513-521.
- ; ——— y Gerloff, G. C. 1972. Differential aluminum tolerance in two snapbean varieties. *Agron. J.* 64:815-818.
- García, O. Jr.; da Silva, W. J. y Massei, M. A. S. 1979. An efficient method for screening maize inbreds for aluminum tolerance. *Maydica* 24:75-82.
- Gill, D. 1983. Differential aluminum tolerance of selected soybean varieties under field conditions. Tesis (M.S.). North Carolina State University, Raleigh, NC, E.U.
- Hanson, H. D. y Kamprath, E. J. 1979. Selection for Al tolerance in soybeans based on seedling root growth. *Agron. J.* 71:581-586.
- Horst, W. J.; Wagner, A. y Marschner, H. 1982. Mucilage protects root meristems from aluminum injury. *Z. Pflanzenphysiol. Bd.* 105. S:435-444.
- ; ——— y ———. 1983. Effect of aluminum on root growth, cell-division rate and mineral element contents in roots of *Vigna unguiculata* genotypes. *Z. Pflanzenphysiol. Bd.* 109. S:95-103.
- Howeler, R. H. y Cadavid, L. F. 1976. Screening rice cultivars for tolerance to Al toxicity in nutrient solutions as compared with a field screening method. *Agron. J.* 68:551-555.
- Katz, L. B. 1983. Effects of Al on peanut growth in solution, potted soil, and field studies and an estimation of combining ability for Al tolerance. Tesis (M.S.). North Carolina State University, Raleigh, NC, E.U.

- Meredith, C. P. 1978. Selection and characterization of aluminum-resistant variants from tomato cell culture. *Plant Sci. Lett.* 12:25-34.
- Moore, D. P.; Kronstad, W. E. y Metzger, R. J. 1977. Screening wheat for aluminum tolerance. En: Madison J. Wright (ed.). *Plant adaption to mineral stress in problem soils*. Cornell University Agricultural Experiment Station, Ithaca, NY, E.U. p. 287-295.
- Munn, D. A. y McCollum, R. E. 1976. Solution culture evaluation of sweet potato cultivar tolerance to aluminum. *Agron. J.* 68:989-991.
- ; Hohenberg, J. S.; Righetti, T. L. y Lauter, D. J. 1981. Soil acidity tolerance of symbiotic and nitrogen-fertilized soybeans. *Agron. J.* 73:407-410.
- ; Keyser, H. H.; Fogle, V. W.; Hohenberg, J. S.; Righetti, T. L.; Lauter, D. L.; Zaraus, M. G.; Clarkin, K. L. y Whitacre, K. W. 1979. Tolerance of soil acidity in symbiosis of mung bean with rhizobia. *Agron. J.* 71:256-260.
- Muzilli, O.; Santos, D.; Palhanc, J. B.; Manetti, J.; Lantmann, A. F.; Garcia, A. y Cateneo, A. 1978. Tolerancia de cultivares de soja e de trigo a acidez do solo. *R. Bras. Ci. Solo* 2:34-40.
- Piha, M. y Nicholaides, J. J. 1983. Selection of acid-tolerant cultivars. En: Nicholaides, J. J.; Couto, W. y Wade, M. K. (eds.). *Agronomic-economic research on soils of the tropics: 1980-1981 technical report*. Soil Sci. Dept., North Carolina State Univ., Raleigh, NC, E.U. p. 49-69.
- Polle, E.; Konzak, C. F. y Kittrick, J. A. 1978a. A rapid screening of wheat for tolerance to aluminum in breeding varieties better adapted to acid soils. *AID Tech. Series Bull.* 21.
- ; ——— y ———, 1978b. Screening for Al tolerance in maize. *AID Tech. Series Bull.* 22.
- Reid, D. A.; Fleming, A. L. y Foy, C. C. 1971. A method of determining aluminum response of barley in nutrient solution in comparison to response in Al-toxic soil. *Agron. J.* 63:600-603.
- Rhue, R. E. 1979. Differential aluminum tolerance in crop plants. En: Mussell, H. y Staples, R. C. (eds.). *Stress physiology in crop plants*. Wiley-Interscience Publ., Nueva York, E.U. p. 62-80.
- y Grogan, C. O. 1977. Screening corn for Al tolerance using different Ca and Mg concentrations. *Agron. J.* 69:755-760.
- Salinas, J. B. 1978. Differential response of some cereal and bean cultivars to Al and P stress on an Oxisol of Central Brazil. Tesis (Ph.D.). Soil Science Dept., North Carolina State University, Raleigh, NC, E.U.

- Sánchez, P. A. y Salinas, J. G. 1981. Low-input technology for managing Oxisols and Ultisols in Tropical America. *Adv. Agron.* 34:279-406.
- Sartain, J. B. 1974. Differential effects of aluminum on top and root growth, nutrient accumulation and nodulation of several soybean varieties. Tesis (Ph.D.). Soil Science Dept., North Carolina State University, Raleigh, NC, E.U.
- y Kamprath, E. J. 1978. Aluminum tolerance of soybean varieties based on root elongation compared with growth in acid soil. *Agron. J.* 70:17-20.
- Toma, N. S. 1978. Differential Al tolerance of sweet potato (*Ipomoea batatas*) cultivars. Tesis (M.S.). North Carolina State University, Raleigh, NC, E.U.

El Calcio y la Penetración de las Raíces en Suelos Altamente Intemperizados

K. D. Ritchey*, D. M. G. Souza** y J. E. Silva**

Introducción

Los efectos dañinos de la sequía se pueden reducir mediante un sistema radical profundo que extraiga el agua y los nutrientes del subsuelo. La saturación alta de aluminio (Al) se ha considerado tradicionalmente como la única limitación química para el crecimiento radical profundo en suelos bien drenados. Sin embargo, la deficiencia de calcio (Ca) es otro factor limitativo del crecimiento de las raíces que debe considerarse en los suelos altamente intemperizados.

Calcio Bajo y Crecimiento de las Raíces en el Subsuelo

La extensión de las deficiencias de Ca en el subsuelo es probablemente más grande que lo que se sabe actualmente. La espectrofotometría de absorción atómica permite medir pequeñas cantidades de calcio y ha mostrado que muchos subsuelos tienen menos de 0.02 meq/100 g (4 ppm) de este elemento esencial (Cuadro 1).

Cuadro 1. Valores del Ca intercambiable en el subsuelo de perfiles seleccionados altamente intemperizados.

Localización	Profundidad (cm)	Calcio intercambiable (meq/100 g)	Referencia
Carimagua, Colombia	114-137	0.019	Rodríguez, 1975
El Piñal, Colombia	18-30	0.011	Rodríguez, 1975
Planaltina, Brasil	15-30	0.009	EMBRAPA-CPAC
Bahía, Brasil	20-40	0.0125	EMBRAPA-CPAC
Virginia, E.U.	68-84	0.020	Daniels et al., 1983.

* Investigador, Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (Contrato IICA-EMBRAPA-Banco Mundial), Centro de Investigación Agropecuaria de los Cerrados (CPAC), Planaltina, D.F., Brasil.

** Investigadores, EMBRAPA/CPAC, Planaltina, D.F., Brasil.

Pruebas Biológicas para Suelos Deficientes en Calcio

Debido a que el Ca no se mueve hacia abajo en la planta, hacia la punta de la raíz, el suministro que la raíz necesita para su elongación y crecimiento debe provenir del medio que rodea la raíz. Las semillas relativamente grandes de los cultivos graníferos son capaces de suministrar los otros nutrimentos necesarios para el crecimiento de la raíz durante varios días.

Este hecho fue utilizado por investigadores del Centro de Investigación Agrícola del Cerrado (CPAC-EMBRAPA) en Planaltina, D.F., en el Brasil central, cuando desarrollaban una prueba biológica simple para la detección de suelos con deficiencias de Ca (Ritchey et al., 1982; 1983a). En una muestra cuidadosamente escogida del subsuelo a capacidad de campo se sembraron de 3 a 7 semillas pregerminadas, que se escogieron de la variedad comúnmente sembrada en el suelo estudiado. Para el análisis rutinario de un gran número de subsuelos, se han utilizado cinco plántulas de trigo en vasos de plástico desechables.

Las plántulas se sembraron en una caja cubierta con una lámina delgada de polietileno para reducir la evaporación y eliminar la necesidad de aplicar agua. La luz ambiental del laboratorio fue suficiente para los cuatro días del ensayo. Después de cuatro días se retiran las plantas y se mide la raíz más larga de cada planta con una regla.

La adición de cantidades mínimas de calcio (0.002 meq/100 g) trajo consigo un aumento en el crecimiento de las plántulas sembradas en una muestra de la capa de 90 a 105 cm de un latosol rojo-amarillo arcilloso (Acrustox típico) libre de aluminio intercambiable (Figura 1). La adición de cloruro de calcio, fosfato de calcio o carbonato de calcio fue igualmente efectiva para aumentar el crecimiento de las raíces de trigo, maíz, y soya (Cuadro 2), mientras que la adición de carbonato de magnesio, $MgCO_3$, no fue efectiva para aumentar el crecimiento vegetativo aunque aumentó el pH del suelo.

Las pruebas hechas en numerosas muestras de perfiles altamente intemperizados de Brasil central han mostrado que a niveles intercambiables de Ca menores de 0.02 a 0.05 meq/100 g hay una reducción notoria del crecimiento radicular que ocurre en cuatro días (Figura 2).

En pruebas realizadas en una colección de muestras de siete perfiles de latosoles rojo oscuro y rojo-amarillo utilizando un

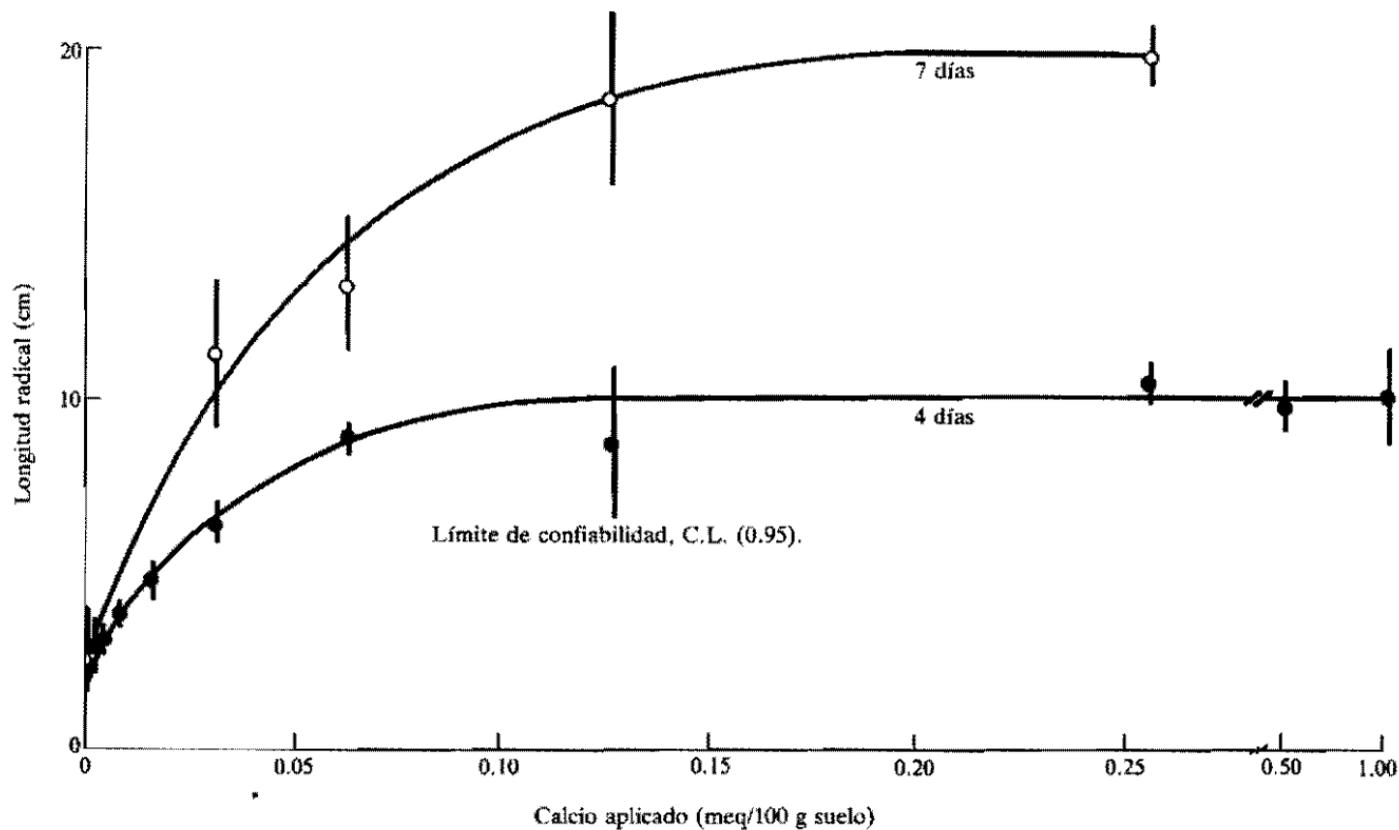


Figura 1. Crecimiento de las raíces de plántulas de trigo como función del Ca añadido en un subsuelo deficiente Acrustox típico.

Cuadro 2. Crecimiento radicular y pH del suelo que resultan de la aplicación de Ca a un suelo proveniente de una profundidad de 90 a 105 cm en un perfil Acrustox típico.

Ca añadido (meq/100 g)	Fuente	pH	Crecimiento radicular (cm) en 4 días		
			Trigo (Moncho BSB)	Maíz (Cargill 111)	Soya (IAC-2)
0	-	5.7	2.7	3.0	1.8
0.21	CaCl ₂	5.0	8.5	15.1	6.8
0.21	Ca(H ₂ PO ₄) ₂ ·H ₂ O	5.9	8.3	16.3	8.9
0.42	CaCl ₂	4.9	9.5	17.5	8.5
0.42	CaCO ₃	6.0	8.7	14.5	8.1

FUENTE: Ritchey et al., 1982.

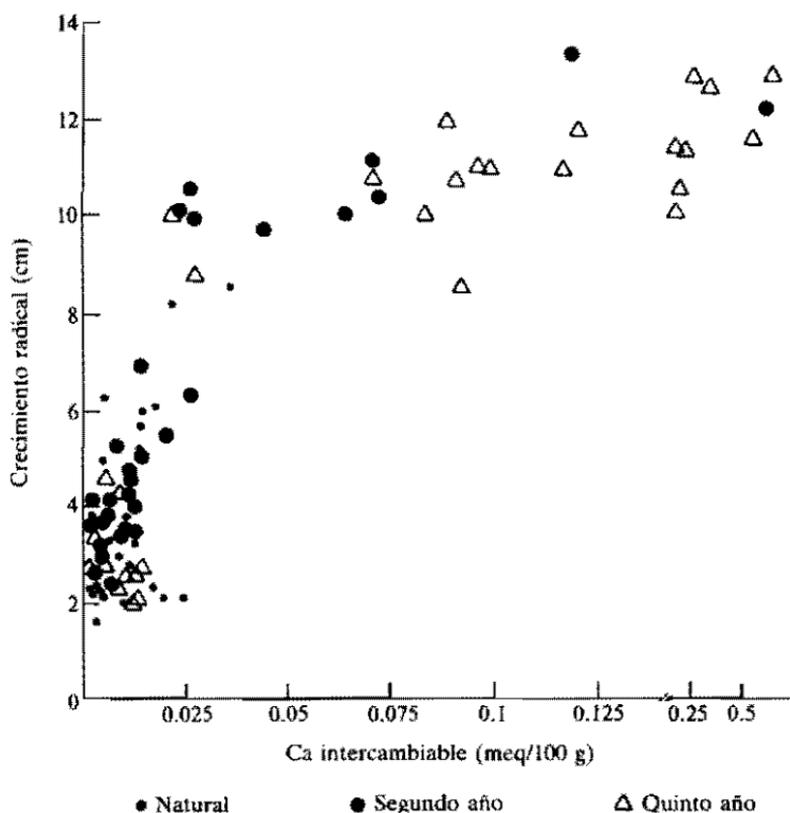


Figura 2. Crecimiento radicular de plántulas de trigo como función del contenido de Ca intercambiable presente en muestras de suelo tomadas a varias profundidades, en tres campos cultivados durante diferentes períodos de tiempo.

FUENTE: Ritchey et al., 1983.

cultivar aparentemente tolerante al Al (Moncho BSB) hubo una reducción pequeña en el crecimiento radicular de cuatro días, que estuvo asociada con los niveles de Al intercambiable de 1 a 3 meq/100 g y con saturaciones muy altas de Al (Figura 3).

Los efectos del aluminio medible por este método serían aquellos que causen, directa o indirectamente, problemas inmediatos en la división y elongación de las células de la raíz, puesto que una prueba de raíces en plántulas de cuatro días no podría medir todos los aspectos de la toxicidad del Al, particularmente aquellos relacionados con los impedimentos de la absorción del P y de otros nutrimentos; éstos, a excepción del Ca, son suministrados por la semilla.

Efectos de Campo en los Subsuelos Deficientes en Calcio

Se llevaron a cabo calibraciones de campo de la prueba biológica de deficiencia de Ca en suelos arcillosos donde los bajos contenidos de Ca fueron el problema principal. Estas son las situaciones en que la detección de deficiencias de Ca sería más útil, debido a que la corrección de esa deficiencia es mucho más fácil que la corrección de la toxicidad de Al.

Después de 17 días de sequía, un cultivo de soya de la variedad 'Cristalina', sembrado en un suelo virgen recientemente abierto, se marchitó seriamente mientras que otro, sembrado en un suelo cultivado durante cinco años, no lo fue (Ritchey et al., 1983a). Las plantas de soya sembradas en el suelo recientemente abierto absorbieron agua en los 60 cm superficiales del perfil, pero sus raíces no penetraron mucho por debajo de ese nivel (Figura 4). En el terreno más antiguo, la absorción de agua fue más uniforme a través del perfil.

Los resultados de las pruebas biológicas con plántulas de trigo mostraron que las condiciones para el crecimiento por debajo de los 60 cm, en el sitio nuevo, fueron inadecuadas para el desarrollo radical, y que el contenido de Ca a esa profundidad era menor de 5 ppm (0.025 meq/100 g).

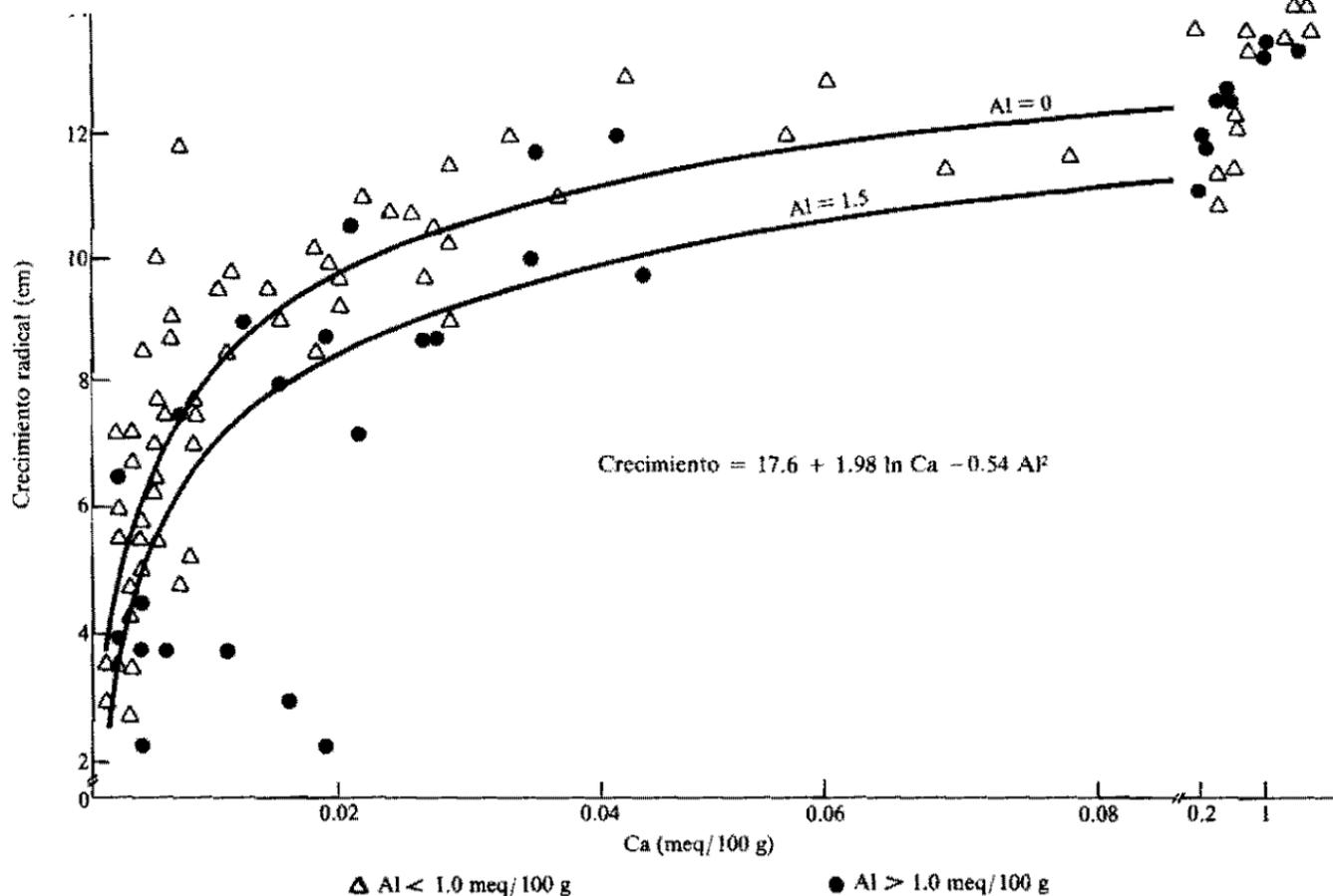


Figura 3. Crecimiento radical de plántulas de trigo como función del contenido de Ca intercambiable presente en muestras de suelo tomadas a varias profundidades, en ocho perfiles de latosoles rojo oscuro y rojo-amarillo en CPAC. Se muestra el crecimiento predicho como función del Ca para valores de Al intercambiable del suelo de 0 a 1.5 meq/100 g (datos sin publicar).

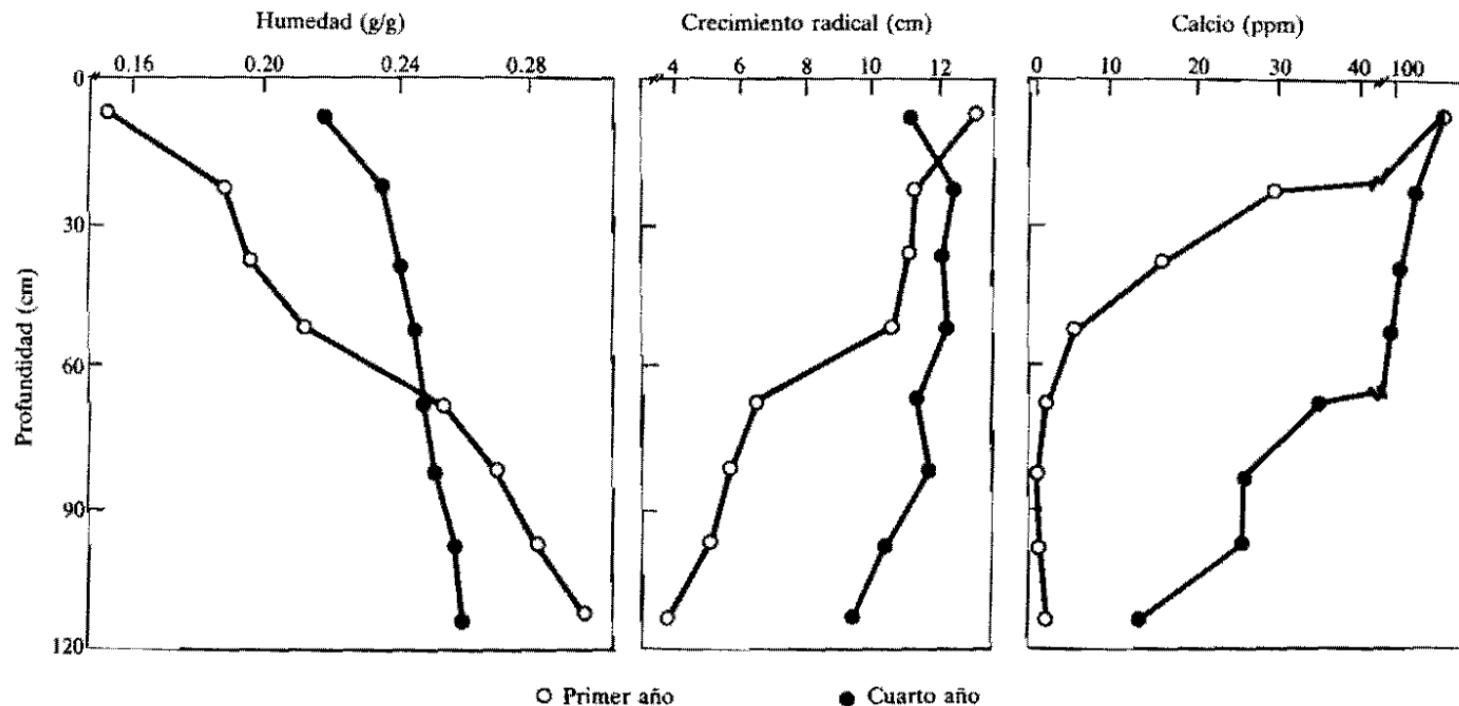


Figura 4. Contenido de humedad, crecimiento radical de plántulas de trigo de la prueba biológica, y contenido de Ca intercambiable como función de la profundidad, en campos de soya, en el primero y cuarto años de cultivo.

FUENTE: Ritchey et al., 1983.

Mejoramiento de la Deficiencia de Calcio en el Subsuelo

En suelos altamente intemperizados recubiertos con óxidos de hierro y de aluminio, el uso que hacen los agricultores del sulfato de calcio y de la cal promueve un aumento duradero en el calcio del subsuelo.

Se hizo una comparación entre tres sitios en un latosol rojo-amarillo arcilloso (Silva y Ritchey, 1982). El Cerrado virgen tenía niveles extremadamente bajos de Ca intercambiable a través del perfil (Figura 5) y los resultados de las pruebas biológicas de crecimiento radicular fueron igualmente bajos (Figura 2). Un agricultor situado a un lado de la carretera fertilizó con superfosfato triple, que contiene muy poco o ningún sulfato de calcio, mientras que el campo al otro lado de la vía recibió 583 kg/ha de sulfato provenientes de superfosfato común (SFC) durante un período de cinco años. En el campo tratado con sulfato

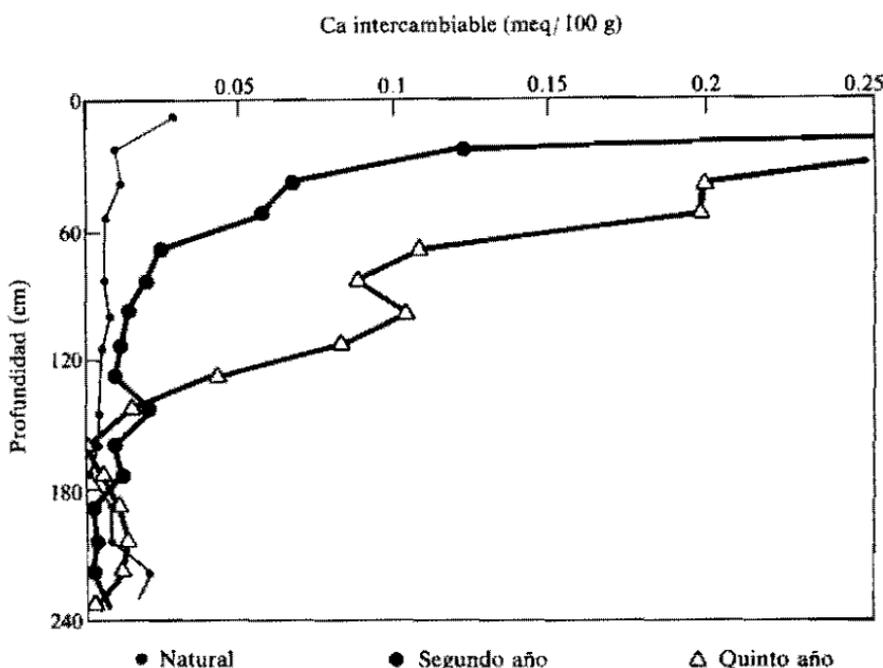


Figura 5. Contenido de Ca intercambiable como función de la profundidad en tres perfiles de un latosol rojo-amarillo, localizados en áreas cultivadas durante diversos períodos de tiempo.

FUENTE: Silva y Ritchey, 1982.

mejoraron la lixiviación del calcio, la prueba biológica del crecimiento de las raíces del trigo y el crecimiento radical de la soya observado en las depresiones del terreno. Después de 30 días de sequía, la soya del terreno que recibió yeso en forma de SFC fue mucho menos afectada que la del otro campo, y su rendimiento fue más alto (Cuadro 3).

Cuadro 3. Fertilizantes aplicados, rendimientos obtenidos y condición de las plantas de soya durante el estrés en campos de agricultores en el segundo y quinto año después de la limpieza del terreno.

Fertilización y respuestas	Cantidad (kg/ha) en:	
	2 años	5 años
Total de nutrimentos aplicados		
S (SO ₄ ⁻)	8	583
P	118	334
Respuestas		
Rendimiento de soya	1020	2760
Apariencia durante sequía de 30 días	Marchita	Normal

FUENTE: Silva y Ritchey, 1982.

Cuando se usen grandes cantidades de yeso, es necesario aplicar cantidades adecuadas de cal dolomítica (Figura 6). El uso de estos dos correctivos promueve una mejor distribución del calcio a través del perfil (Ritchey et al., 1980); también reduce las pérdidas por lixiviación de K y Mg, las cuales pueden ser serias si se aplican grandes cantidades (3 a 6 t/ha de sulfato de calcio) sin cal (Ritchey et al., 1983b).

Respuestas por Especie y Genotipo al Aluminio y al Calcio

Para examinar rutinariamente la respuesta de las especies y cultivares a los diferentes niveles de Ca, se trataron con diferentes cantidades de sulfato de calcio el subsuelo de un latosol rojo-amarillo libre de Al intercambiable y el de un latosol rojo oscuro que tenía cerca de 1.5 meq/100 g de Al intercambiable.¹ Los híbridos comerciales y las líneas de sorgo fueron suministradas por Renato Borgonovi, Gilson Pitta y Robert Schaffert del Centro Nacional de Investigación en Maíz y Sorgo de

1. Ritchie, K.D., Sousa, D.M.G. y Sansonowicz, C. Información sin publicar.

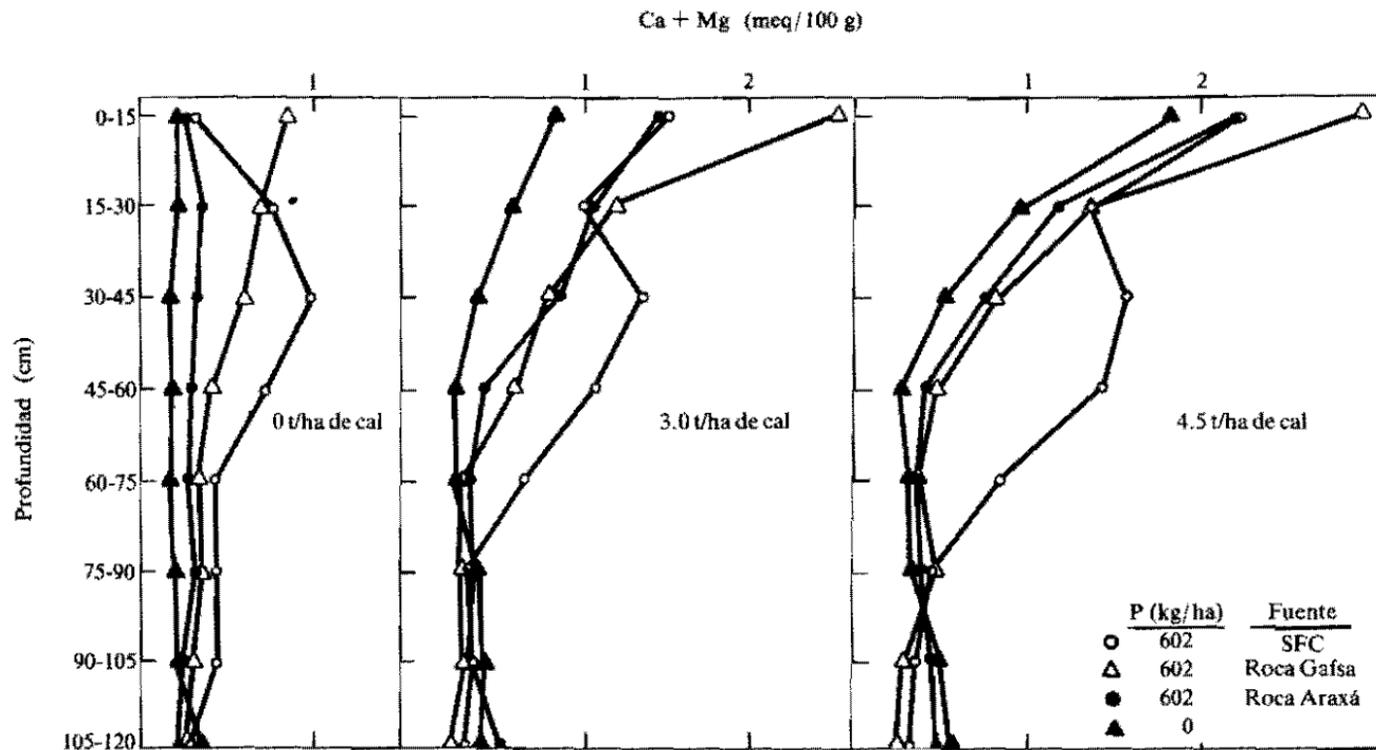


Figura 6. Bases intercambiables como función de la profundidad en un latosol rojo oscuro que recibió aproximadamente 2100 kg/ha de $SO_4^{=}$ como superfosfato ordinario (SFC), comparando éste con fuentes que no suministraban azufre, en tres tasas de aplicación de cal.

EMBRAPA (CNPMS) en Sete Lagoas, Minas Gerais, Brasil, y mostraron diferentes respuestas a los niveles de Al en el suelo. Se graficaron las longitudes radicales relativas a la longitud de las raíces en la mejor repetición de cada prueba versus la cantidad de cal añadida. El híbrido AG 1002, que tuvo buenos rendimientos en el CPAC en suelos cultivados durante varios años, mostró un crecimiento radicular seriamente afectado bajo condiciones de alta saturación de aluminio o de baja concentración de calcio en el suelo —o en ambas (Figura 7). Se observaron resultados similares con TX 399B y BR 007B (Figuras 8 y 9). SC 283, por otro lado, mostró una reducción mucho más pequeña en presencia del aluminio (Figura 10) al igual que SC 112-14 (Figura 11).

Graficando las 'longitudes relativas con aluminio' obtenidas al dividir la longitud radical obtenida en el suelo con alta concentración de aluminio por la longitud radical obtenida en el suelo libre de aluminio intercambiable se observa una separación clara entre las líneas y los híbridos probados (Figura 12). Borgonovi, Schaffert y Pitta encontraron (ver: Mejoramiento de Sorgos...) que las líneas SC 283 y SC 112-14, que parecían menos afectadas por el aluminio en la prueba de cuatro días, eran tolerantes a este elemento. Aunque esta coincidencia es alentadora, se debe recordar sin embargo que la tolerancia a altas concentraciones de

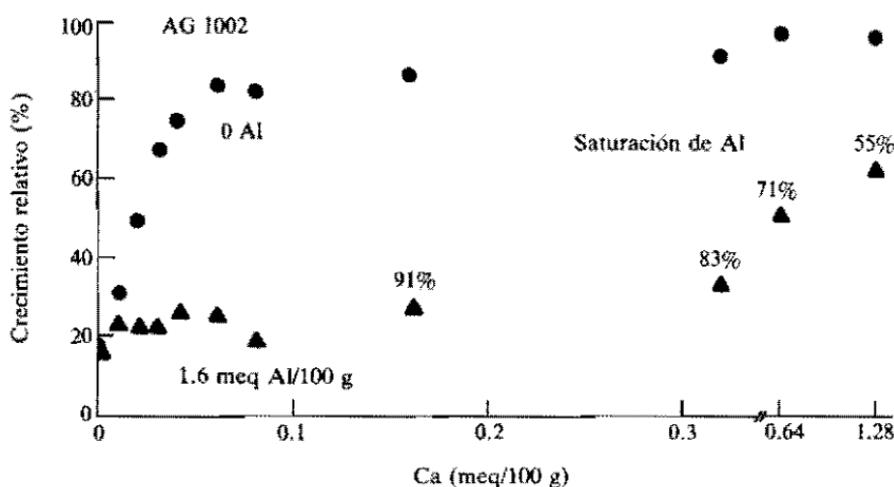


Figura 7. Longitud radical relativa del híbrido de sorgo AG 1002, cuatro días después de la siembra en el subsuelo de un latosol rojo-amarillo libre de aluminio intercambiable y en el de un latosol rojo oscuro con una saturación alta de aluminio, como una función de los niveles aplicados de sulfato de calcio.

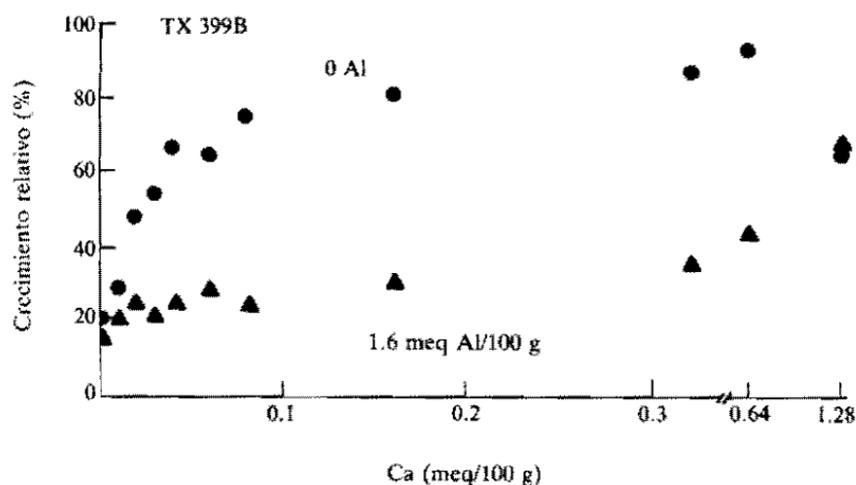


Figura 8. Longitud radical relativa del híbrido de sorgo TX 399 B, cuatro días después de la siembra en el subsuelo de un latosol rojo-amarillo libre de aluminio intercambiable y en un latosol rojo oscuro con alta saturación de aluminio, como función de los niveles aplicados de sulfato de calcio.

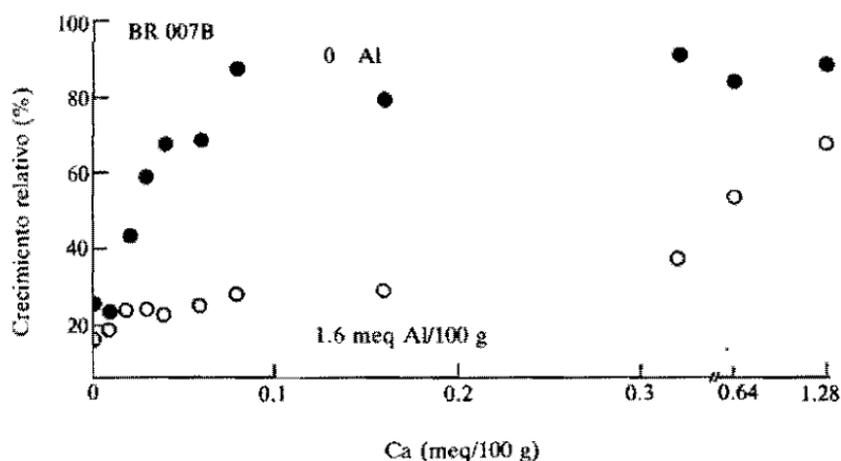


Figura 9. Longitud radical relativa del híbrido de sorgo BR 007 B, cuatro días después de la siembra en el subsuelo de un latosol rojo-amarillo libre de aluminio intercambiable y en un latosol rojo oscuro con alta saturación de aluminio, como función de los niveles aplicados de sulfato de calcio.

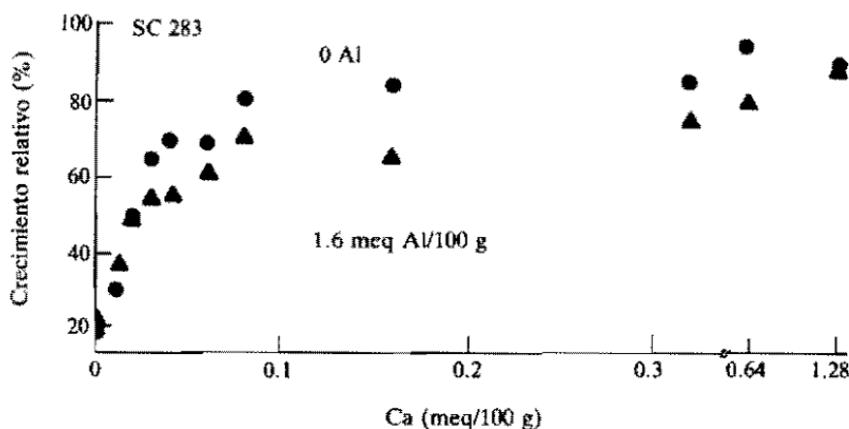


Figura 10. Longitud radical relativa del híbrido de sorgo SC 283, cuatro días después de la siembra en el subsuelo de un latosol rojo-amarillo libre de aluminio intercambiable y en un latosol rojo oscuro con alta saturación de aluminio, como función de los niveles aplicados de sulfato de calcio.

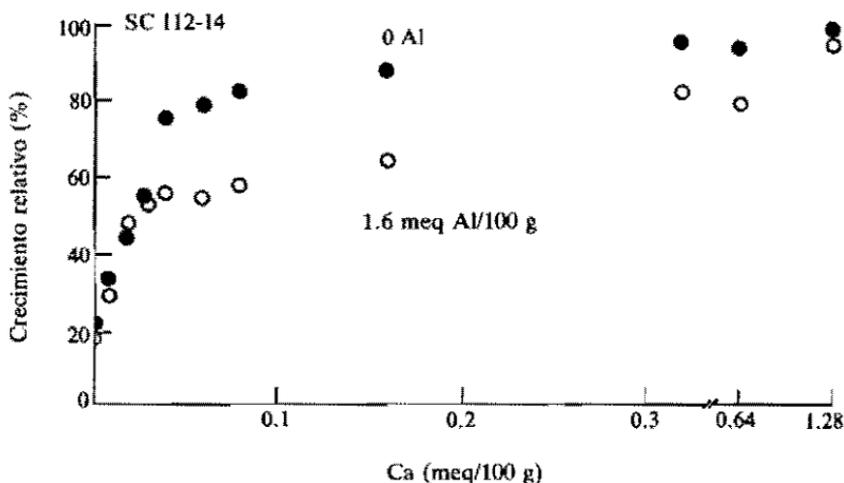


Figura 11. Longitud radical relativa del híbrido de sorgo SC 112-14, cuatro días después de la siembra en el subsuelo de un latosol rojo-amarillo libre de aluminio intercambiable y en un latosol rojo oscuro con alta saturación de aluminio, como función de los niveles aplicados de sulfato de calcio.

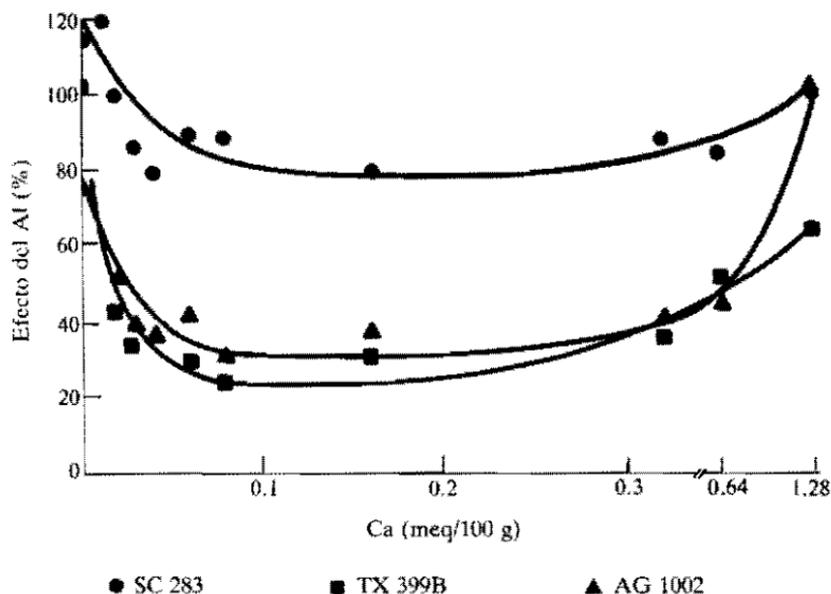


Figura 12. Crecimiento radical de plántulas de sorgo de cuatro días de sembradas en un subsuelo con alta saturación de aluminio, en relación con su crecimiento en un subsuelo libre de aluminio intercambiable, como función de los niveles aplicados de sulfato de calcio.

aluminio en el campo incluye muchos aspectos adicionales no comprobados en un ensayo de plántulas de cuatro días. Para las líneas sensitivas cultivadas en subsuelos con altos contenidos de aluminio, la toxicidad por Al restringió seriamente el crecimiento de las raíces aun con niveles de calcio en el suelo muy superiores a los del rango crítico. La longitud de las raíces de cuatro días comenzó a aumentar solamente cuando la cantidad añadida de sulfato de calcio era suficiente para reducir notoriamente la saturación estimada de aluminio (Figura 7).

Para las líneas tolerantes a Al, y en el subsuelo libre de aluminio, se muestra claramente la severidad de la deficiencia de calcio (Figuras 7 a 11). En el suelo sin tratar, la longitud radical fue solamente un cuarto de la obtenida cuando se aplicó 0.08 meq/100 g de Ca (Figura 13).

En el suelo libre de Al intercambiable, los cinco genotipos de sorgo probados no mostraron ninguna diferencia entre sí respecto al crecimiento considerado como una función del Ca añadido (Figura 13). Nótese que los valores de Ca están presentados en una escala logarítmica. El cambio en la pendiente de

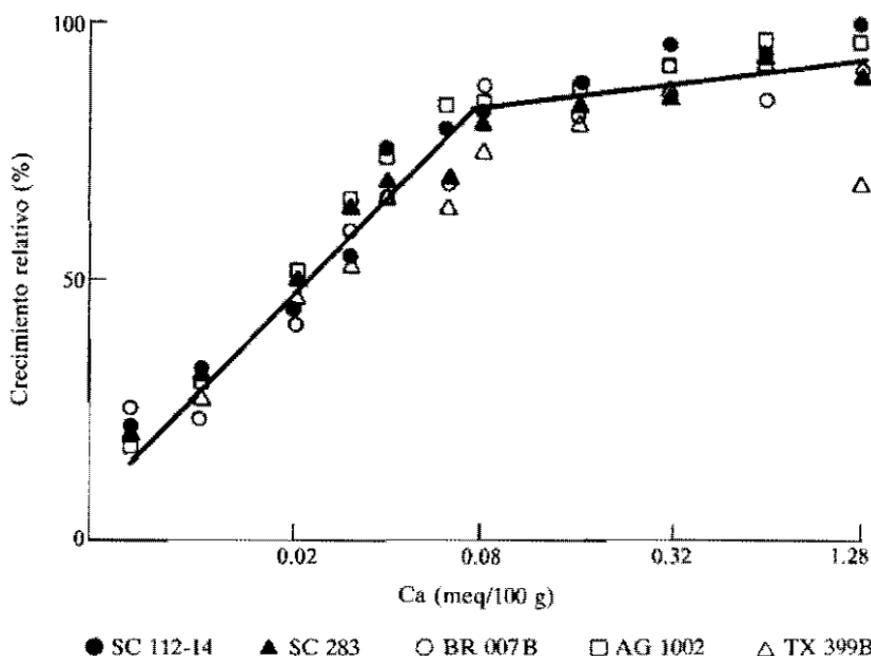


Figura 13. Crecimiento radical relativo de cinco genotipos de sorgo como función de los niveles aplicados de sulfato de calcio en el subsuelo de un latosol rojo-amarillo libre de aluminio intercambiable. Nótese que el eje horizontal (Ca) tiene una escala logarítmica. La longitud radical relativa se basó en la máxima longitud radical alcanzada por cada genotipo.

la escala logarítmica cerca de 0.08 meq/100 g podría reflejar la satisfacción de las necesidades nutricionales de Ca de la planta.

Las comparaciones preliminares hechas entre seis especies, en un grupo de muestras de suelo de Goiânia con contenidos variables de Ca y Al (Figura 14), mostraron que el arroz IRAT-4 y el sorgo Brasiful NK 233 eran, aparentemente, más capaces de mantener un crecimiento radicular cercano al máximo en concentraciones ligeramente menores de Ca que las requeridas por *Leucaena leucocephala* cv. Cunningham, por *Mucuna aterrimum* (mucuna preta, un cultivo rústico de abono verde), por la variedad de trigo Moncho BSB, y por un cultivar de caupí.² Hubo una diferencia menor entre esas especies para el nivel del Ca en el cual el crecimiento radicular fue la mitad del máximo. En esta prueba, solamente el sorgo mostró un efecto dañino causado por el Al intercambiable.

2. Ritchey, Sansonowicz y Sousa. Información sin publicar.

la humedad del subsuelo para resistir la sequía. La prueba biológica llevada a cabo en suelos con aluminio intercambiable y sin el separó claramente las líneas de sorgo tolerantes y susceptibles al aluminio previamente identificadas como tales. No fue evidente ninguna diferencia entre las líneas de sorgo en relación con los requisitos de calcio, aunque parece que hubo algunas diferencias entre las especies ensayadas.

Referencias

- Daniels, W. L.; Amos, D. F. y Baker, J. C. 1983. The influence of forest and pasture on the genesis of a humid temperate-region Ultisol. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 47:560-566.
- EMBRAPA-CPAC (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária-Centro de Pesquisa Agropecuária dos Cerrados). Relatório técnico anual do Centro de Pesquisa Agropecuária dos Cerrados 1982-1983.
- Ritchey, K. D.; Silva, J. E. y Costa, U. F. 1982. Calcium deficiency in clayey B horizons of savanna Oxisols. *Soil Sci.* 133:378-382.
- ; ———y ———. 1983b. Lixiviação de cálcio e magnésio em solos. En: van Raij, B.; Bataglia, O. C. y da Silva, N. M. (eds.). *Acidez e calagem no Brasil*. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo. Campinas, São Paulo. p. 109-125.
- ; Sousa, D. M. G.; Lobato, E. y Correa, O. 1980. Calcium leaching to increase rooting depth in a Brazilian savanna Oxisol. *Agron. J.* 72:40-44.
- Rodríguez, P. M. S. 1975. Calcium, magnesium, and potassium status in some soils of the Eastern Plains of Colombia. Tesis (M.S.). Agronomy Dept., Cornell University, Ithaca, NY, E.U. 177 p.
- Silva, J. E. y Ritchey, K. D. 1982. Lixiviação de cálcio e crescimento de raízes em Oxisolos de Cerrado. En: *Sexto Simpósio sobre o Cerrado, 1982, Brasília, D.F., Brasil*.

Evaluación del Sorgo en los Llanos Venezolanos

Héctor Mena T.*

Introducción

Venezuela ha incrementado el consumo y, por lo tanto, la superficie de siembra del sorgo granífero en relativamente corto tiempo, convirtiendo este cultivo en el más importante después del maíz. Así, para el año de 1970 se sembraron sólo 2954 ha, mientras que en 1980 se llegó a 264,929 ha. En Venezuela, el cultivo tiene básicamente un doble propósito, y el grano se usa fundamentalmente para preparar raciones de alimentos concentrados. Actualmente se satisface solamente un 40% de la demanda total de grano con aproximadamente 350,000 t de producción nacional. Como consecuencia de las grandes superficies sembradas con sorgo, se hace necesario el uso de apreciables cantidades de semilla, la cual viene, principalmente, de la importación, debido a graves problemas no solucionados aún, en la producción de híbridos y de semilla nacional. En vista de esto, desde el año 1977 se implementó un programa nacional de evaluación de los sorgos que entraban por importación para medir su valor de adaptación a nuestras variadas áreas agroecológicas (Cuadro A1, Apéndice). Desde esa fecha, han sido evaluados más de 350 híbridos de sorgo; la mayoría de ellos han sido descartados por razones fitosanitarias del cultivo, y otros fallaron por mostrar bajos niveles de adaptación. Sólo se mantienen cerca de 23 como híbridos comercializables en este país.

Venezuela presenta una gran variabilidad edáfica, razón por la cual se debe tener un rango amplio de material genético que responda a cada una de estas variantes de suelos. En general, los suelos donde se siembra sorgo son de muy baja fertilidad

* Director y coordinador de las Evaluaciones de Sorgo, Centro Nacional de Investigaciones Agropecuarias (CENIAP), Maracay, Aragua, Venezuela.

natural, por lo que requieren de encalado y de altas fertilizaciones para producir buenos rendimientos.

Limitaciones de los Suelos de Venezuela

De acuerdo con Comerma (1976), Venezuela dispone de muy pocos suelos (2%) que no presenten limitaciones agrofísicas. Las principales limitaciones de estos suelos se pueden describir así:

Un 44% con excesivo relieve; son regiones montañosas y de colinas asociadas a las mismas.

Un 32% de baja fertilidad natural; comprende los llanos centrales, los occidentales, y los del sur del país. De estos suelos, más del 87% presentan problemas de muy baja fertilidad (Ultisoles y Oxisoles), lo que acarrea el uso de enmiendas y fertilizaciones frecuentes. El 13% restante presenta limitaciones, pero menores que las mencionadas anteriormente. La acidez y el aluminio intercambiable de estos suelos resultan negativos para el sorgo.

Un 18% con problemas de drenaje, conformados por las planicies aluviales al sur del Lago de Maracaibo, los Llanos Centrales, los Llanos Occidentales, y el Delta del Orinoco. Son zonas planas difíciles de drenar y complicadas para mecanizar.

Un 4% con problemas de acidez, al norte del país. En forma general, se estima que un 30% de los suelos Ultisoles y Oxisoles de Venezuela presentan problemas de acidez y de aluminio intercambiable que pueden afectar los rendimientos del sorgo.

En el Cuadro 1 se presentan los suelos típicos de la altiplanicie de la Mesa de Guanipa, región de los Llanos Orientales, donde el mayor porcentaje corresponde a los Oxisoles; el área cubre más de medio millón de hectáreas y tiene los mayores problemas de aluminio intercambiable. Esta vasta extensión está caracterizada por un relieve plano con vegetación gramínea, interrumpida por bosques de galería. Los suelos son meteorizados (lixiviales), de textura arenosa, pobres en nutrientes, de reacción ácida en más de un 50%, y con poca retención de humedad. Bajo estas condiciones, es necesario encalar con 1 a 1.5 t/ha para obtener rendimientos aceptables de sorgo.

Cuadro 1. Ultisoles y Oxisoles de la altiplanicie de la Mesa y su distribución en grandes subgrupos.

Suelos	Area (ha)
Ultisoles	
Palcustults, textura media, bien drenados	162,000
Plinthustults, textura media	124,000
Plinthustults, poco profundos	56,000
Plinthaquults, pesados	32,000
Total Ultisoles	374,000
Oxisoles	
Haplustox, textura media, bien drenados	429,000
Haplustox, textura liviana	68,000
Haplustox, severamente erosionados	16,000
Haplustox, pedregosos y con montículos	2,000
Total Oxisoles	515,000
Superficie total	2,797,015

Ensayos Regionales en los Llanos de Venezuela

Según los resultados obtenidos en varios años de ensayos, se han logrado consolidar, en total, 28 cultivares de buen comportamiento en Venezuela. Dentro de este grupo hay algunos materiales nacionales que superan sustancialmente los rendimientos de los híbridos importados (Cuadro 2 y Cuadro A2, Apéndice), como los híbridos Chaguaramas-3 y Prosevenca-5. La mayor parte de estas evaluaciones son realizadas en los Llanos Centrales, en los Llanos Centroccidentales y en los Llanos Orientales de Venezuela, donde la mayor parte de los suelos son Ultisoles u Oxisoles. Cabe mencionar que los cultivares nacionales son, en general, tardíos, de mayor altura, de más follaje, y resisten mejor las condiciones de estrés que los híbridos importados. Igualmente, son más resistentes a las condiciones de acidez típicas de casi todos los llanos de Venezuela, lo que hace suponer que muestran buenos niveles de tolerancia al aluminio intercambiable existente en estos suelos. Esta superioridad puede observarse también en el Cuadro 3, donde aparecen los rendimientos a nivel nacional.

Entre los híbridos importados que muestran mejor comportamiento están NK Savanna-5, Pioneer 815-B, Pioneer 816-B, DeKalb D-59+, y DeKalb DK-64. Los híbridos nacionales, en general, son del tipo de cruce 'templado x tropical', donde la

Cuadro 2. Rendimiento promedio (12% de humedad) de los cultivares de sorgo granífero en ensayos regionales, en Venezuela (1980-1982).

1980 (16 ensayos)		1981 (14 ensayos)		1982 (12 ensayos)	
Cultivar	Rendimiento (kg/ha)	Cultivar	Rendimiento (kg/ha)	Cultivar	Rendimiento (kg/ha)
CHAGUARAMAS-3	4179	CHAGUARAMAS-3	4529	PROSEVENCA-5	4290
NK SAVANNA 5	3977	FUNK'S GHW 1758	4297	PIONEER 816-B	3952
DEKALB D-59 +	3698	PROSEVENCA-5	4289	ASGROW 8101	3882
PIONEER 816-B	3633	PIONEER 816-B	4103	PIONEER 815-B	3828
PIONEER 8225	3480	PIONEER 815-B	3880	DEKALB D-59 +	3750
PIONEER 815-B	3480	WAC 5005	3859	PW 861 DR	3691
PIONEER 8199	3375	DK-64	3819	PW 860 DR	3506
ORODR II	3338	NK-SAVANNA-5	3716	DK-64	3473
ACCO DR 1095	3301	ACCO DR 1095	3708	WAC 5005	3408
WARNER 832 DR	3291	PIONEER 8225	3565	PENTA 5580	3373
WAC 5018	3275	DEKALB D-59 +	3511	WX 832 DR	3343
WAC 5005	3238	PW 861 DR	3488	GHW 2554	3327
WARNER 641	3224	PIONEER 8199	3418	ACCO DR 1095	3320
TE HONDO	3190	DEKALB D-55	3393	LLANERO-1	3262
PW 860	3104	H-791 A	3354	PAG 6658	3233
DEKALB D-55	3096	Wx 832 DR	3338	TE HONDO	3114
NK SAVANNA-3	2912	PW 860	3311	BRAVO E	3052
TE 7842	2888	DK 063	3310	PIONEER YB 817	2883
PIONEER 8501	2821	DK 045	3300	J 404	2869
WAC 5008	2773	ACCO DR 1075	3276	G 499 BR	2428
MASTER DMT	2767	TEXAS TRIUMPH 68-D	3183		
FUNK'S G-577	2662	TE HONDO	3112		
NK 266	2581	MONAGAS-1	3051		
NK 180 DMR	2286	FUNK'S G-589	2819		
PIONEER 8311	2546	GUARICO-2	2678		

Cuadro 3. Comparación de rendimientos (12% de humedad) entre híbridos importados y nacionales.

Híbrido	Rendimiento (kg/ha) en			
	Samán Mocho, Carabobo	Coro	Chaguaramas, Guárico	
			1972	1973
Híbrido importado más rendidor	5624	5968	3354	3377
Mejor híbrido nacional experimental	9230	8581	6413	6449

línea tropical suministra, en forma dominante, una serie de genes de adaptación a condiciones tropicales como los suelos pobres y ácidos, la tolerancia al aluminio, los cambios fuertes de temperatura, y la humedad. En este sentido, estos híbridos son tolerantes a la fitotoxicidad causada por insecticidas y herbicidas. Conviene anotar el hecho de que los mejores híbridos en Venezuela, tanto nacionales como importados, presentan grano de colores oscuros con alto contenido de taninos, lo que sugiere una relación entre alto contenido de taninos y buena adaptación tropical (Chaguaramas-3, NK Savanna 5, Pioneer 815-B, Pioneer 816-B, Prosevenca-5). Esta situación podría explicarse por el origen tropical de los sorgos y como efecto de la selección natural. Sin embargo, últimamente han sido evaluadas algunas variedades de grano blanco de muy buen comportamiento.

Algunas Experiencias con el Sorgo Tolerante al Aluminio

Solórzano (1971) y Sánchez (1978) realizaron pruebas en Venezuela para medir la tolerancia de algunos híbridos nacionales al aluminio intercambiable, tanto en el campo como en el invernadero, y para comparar la tolerancia de los híbridos de la serie Chaguaramas con otros híbridos nacionales (Cuadro 4). Los Chaguaramas dieron, en el lote testigo (sin cal), rendimientos superiores a los 3000 kg/ha, en promedio, mientras que los otros híbridos dieron rendimientos bajos. Por otro lado, al hacer incrementos sucesivos de cal, los rendimientos tendían a aumentar en aquellos materiales susceptibles, mientras que los híbridos Chaguaramas se mantenían relativamente estables y con niveles altos de rendimiento.

El suelo sin cal presentaba un pH de 4.4 y 0.80 meq Al/100 g en el estrato de 0-10 cm, y en el subsuelo un pH de 4.1 y

Cuadro 4. Rendimiento promedio en grano (10% de humedad) para las series Barinas y Chaguaramas aplicando diferentes niveles de caliza.

Serie del suelo	Rendimiento (kg/ha) aplicando caliza ^a (kg/ha) de:						Promedio
	0(0)	650(0.5)	1300(1.0)	2600(2.0)	3250(2.5)	3900(3.0)	
Barinas	732	1447	2128	1585	2123	1892	1651
Chaguaramas	3050	3617	4747	5053	3957	4747	4195

a. Entre paréntesis, la cantidad de Al intercambiable que es neutralizada en el suelo.

1.30 meq Al/100 g (Cuadro 5). Al aplicar caliza para neutralizar la mitad del Al intercambiable, bajó el valor de los meq Al/100 g en un 25% en el estrato superior y ligeramente en el inferior, en tanto que el pH se mantuvo igual al del testigo. Al aplicar caliza para neutralizar todo el Al, el valor de los meq Al/100 g bajó en un 45% en el estrato superior y 30% en el inferior; sin embargo, el pH se mantuvo casi igual que el del testigo. Más allá de este nivel, al aplicar mayores niveles de caliza, existe una tendencia a la estabilización de los rendimientos y luego éstos caen progresivamente. Esto puede deberse a que ya en este punto se logró bajar el nivel de Al intercambiable a niveles no tóxicos. Con niveles aún mayores, el pH sube alrededor de 6 y prácticamente desaparece el Al intercambiable.

Clemente y Sánchez (1970) en los Llanos Orientales, donde los suelos tienen pH 4.2 y bajos nutrimentos, incrementaron el rendimiento y la proteína del sorgo en 42% y 32%, respectivamente, al aplicar 1 t/ha de caliza. Un experimento parecido se describe en el Cuadro A3 del Apéndice.

Cuadro 5. Valores de pH y de Al intercambiable del suelo con diferentes dosis de caliza, a los 80 días de aplicarla.

Dosis de caliza (kg/ha)	Profundidad (cm)	pH	meq Al/100 g
0	0-10	4.4	0.80
	10-25	4.1	1.30
650	0-10	4.4	0.61
	10-25	4.2	1.15
1300	0-10	4.5	0.46
	10-25	4.0	0.94
2600	0-10	5.7	0.04
	10-25	5.1	0.06
3250	0-10	6.1	0.04
	10-25	5.1	0.12
3900	0-10	6.0	0.03
	10-25	5.1	0.04

Conclusiones

Se puede concluir mencionando los siguientes aspectos:

Existe un grupo de híbridos seleccionados de sorgo, tanto importados como nacionales, que permiten buenos niveles de rendimiento y tienen una buena adaptación.

Los híbridos nacionales están mejor adaptados que los importados por su tolerancia a los suelos ácidos y al Al intercambiable.

En Venezuela se evalúan los factores de adaptación, y de tolerancia a los suelos ácidos y al Al, porque los cultivares de sorgo se siembran en suelos Oxisoles y Ultisoles.

Los híbridos tropicales resultan básicamente del cruce de líneas templadas x líneas tropicales.

Resumen

Venezuela experimentó alta demanda de semilla de sorgo híbrido en años recientes, y la ha satisfecho en un 90% a través de la importación. Por tal razón, el programa regional de sorgo había logrado un nivel de adaptación muy bajo a los llanos de Venezuela. Los suelos de esas regiones son muy escasos en nutrimentos y tienen, generalmente, Al y bajo pH (Ultisoles y Oxisoles). Actualmente hay 23 híbridos aprobados para importación y algunos híbridos nacionales; éstos superan a los anteriores en cuanto a su capacidad de adaptación. De los importados sobresalen NK Savanna 5, Pioneer 815-B, Pioneer 816-B, DeKalb DK-64 y DeKalb D-59 + . De los nacionales, Chaguaramas-3 y Prosevenca-5 dan rendimientos mejores y son tolerantes a suelos ácidos y a aluminio intercambiable; además tienen buen comportamiento en condiciones extremas del clima.

Los híbridos adaptados a regiones tropicales resultan del cruce de líneas templadas con tropicales, los cuales han dado muy buen resultado tanto en Venezuela como en algunas zonas de Colombia.

De la experiencia con suelos ácidos y aluminio intercambiable, estos híbridos resultan sobresalientes por su tolerancia a los factores ambientales de esas regiones.

Apéndice

Cuadro A1. Localidades, situación, suelos, precipitación y temperaturas en los ensayos regionales de sorgo en Venezuela.

-
1. Gonzalito-Turmero, Aragua: Suelos de textura media, clase II, moderadamente pobres en fósforo y potasio. Temperatura media 25.2 °C. Precipitación de 1400 mm/año.
 2. Villa de Cura, Aragua: Suelos semi-pesados, clase III y II. Temperatura media de 24.5 °C. Precipitación de 1200 mm/año.
 3. El Sombrero, Guárico: Suelos pobres de sabana, lateríticos, ácidos bajos en P y N. Clase III. Temperatura media de 26.5 °C. Precipitación de 850 mm/año.
 4. Chaguaramas, Guárico: Suelos de colina, arenosos, pobres, clase II con problemas de erosión y acidez. Temperatura de 26.8 °C y precipitación de 700 mm/año.
 5. Las Mercedes, Guárico: Suelos de sabana intermedia, de textura mediana y pesada, poca fertilidad natural. Temperatura media 26.7 °C y precipitación de 800 mm/año.
 6. Valle de la Pascua, Guárico: Suelos de colina, clase II, pobres en N y P. Acidos. Temperatura media de 26.5 °C y precipitación de 900 mm/año.
 7. Calabozo, Guárico: Suelos pesados de sabana, de baja fertilidad, clases III y IV. Temperatura media de 27.3 °C y precipitación de 790 mm/año.
 8. Aruare, Portuguesa: Textura media en los suelos, pobres en P y K. Temperatura media de 26.5 °C y precipitación de 1680 mm/año.
 9. Barinas, Estado Barinas: Suelos de textura media y pesada. Relativa buena fertilidad. Precipitación de 1780 mm/año y temperatura media de 26.5 °C.
 10. Monagas, Maturín: Suelos pobres, de textura arenosa media, ácidos, bajos en P y K. Temperatura media de 27.5 °C y precipitación media de 1000 mm/año.
-

Cuadro A2. Resumen de un ensayo regional de sorgo hecho en El Sombrero, Guárico, Venezuela, en 1981.

Cultivar	Longitud del pedúnculo	Altura de planta	Longitud de panoja	Acame	Deterioro del grano	Daño ^a por mosca pájaro		Relación con media del ensayo ^b	Rendimiento 12% de humedad (kg/ha)
	(cm)	(cm)	(cm)	(%)					
CHAGUARAMAS-3	26	160	22	1	1	1	2	274.9	3420
PROSEVENCA-5	23	162	21	1	1	1	2	222.4	2767
NK SAVANNA-5	34	138	22	5	1	1	2	188.7	2374
GUARICO-2	6	123	21	1	1	1	2	145.8	1814
PIONEER 816-B	19	110	16	10	6	2	1	126.7	1576
MONAGAS-1	14	146	20	1	1	1	4	108.1	1345
DEKALBDK-64	26	126	23	1	1	1	4	106.8	1329
PW 860	12	103	19	2	2	2	3	101.7	1265
PIONEER 815-B	15	95	16	8	1	2	2	73.9	919
DEKALBDK-045	12	85	17	1	2	2	2	72.4	901
PIONEER 8225	10	115	18	9	6	1	1	71.5	889
PIONEER 8199	23	108	22	5	4	5	3	65.4	814
TEXAS THRIUMP 68-D	19	112	17	5	2	1	3	62.9	783
FUNK'S G-589	18	102	17	2	4	2	4	62.2	774
WARNER 832 DR.	15	104	17	3	3	2	3	61.3	763
TE HONDO	20	100	16	3	2	1	2	60.5	753
DEKALBD-59+	19	112	19	5	4	2	3	60.5	752
DEKALBDK-063	18	110	17	1	5	1	2	48.9	609
DEKALBD-55	10	124	24	5	2	1	3	43.0	535
H-791 A	16	105	21	8	5	2	6	42.3	526

a. Calificación según escala visual (1 = mínimo, 6 = máximo).

b. \bar{X} = 1244.1 kg/ha; CV = 22.7%; DMS (0.05) = 481.3 kg/ha; DMS (0.01) = 654.3 kg/ha.

Cuadro A3. Efecto de la adición de la cantidad de cal necesaria para obtener el máximo rendimiento sobre algunas formas de acidez presentes en nueve suelos ácidos del nororiente venezolano. Experimento 7.

Suelos	Dosis de cal para máximo rendimiento (t CaCO ₃ /ha)	pH al momento de la siembra	Máximo rendimiento del sorgo, en peso seco (g/matero)	Aumento máximo en rendimiento con adición de cal (%)	Al intercambiable		Acidez intercambiable	
					Presente (meq/100 g)	Neutralizado (%)	Presente (meq/100 g)	Neutralizada (%)
San Tomé	0,5	5,9	4,2	90,48	—	100,00	0,90	77,50
Guanipa	0,5	5,4	6,6	19,70	0,20	62,26	0,40	50,00
Sabaneta	1,0	5,3	13,2	36,36	0,30	67,39	0,57	56,82
Uracoa	1,5	5,2	13,8	31,88	0,62	65,93	0,90	60,53
Mánamo	1,0	5,7	23,6	91,02	—	100,00	0,15	40,00
B. Guarapiche	1,0	5,3	16,4	92,13	0,14	85,11	0,32	73,55
Guarataro	6,5	5,3	29,2	94,08	1,20	80,42	1,60	76,81
San Agustín	2,0	5,3	29,6	91,99	1,25	39,90	1,70	37,73
Delta	8,0	4,5	37,9	96,17	0,77	74,59	1,33	68,54

FUENTE: Sánchez, 1978.

Referencias

- Clemente, L. y Sánchez, C. 1970. Respuesta del sorgo a la aplicación de cal y microelementos en un suelo franco-arenoso de sabana. Tesis. Universidad de Oriente, Jusepín, Monagas, Venezuela.
- Comerma, J. A. 1976. Consideraciones sobre el manejo de Ultisoles y Oxisoles. En: Memorias del cuarto congreso venezolano de la ciencia del suelo. Maturín, Venezuela.
- y Paredes, R. 1977. Principales limitaciones y potencial agrícola de las tierras en Venezuela. 13 p. (Multicopiado.)
- COPLANARH (Comisión del Plan Nacional de Aprovechamiento de los Recursos Hidráulicos). 1973. Inventario nacional de tierras; informe geomorfológico de los Llanos Orientales. 164 p.
- de López, I. 1981. Respuesta al encalado en suelos Oxisoles y Ultisoles de Venezuela. *Agron. Trop.* 31(1-6):21.
- González, R. 1970. Efectos de las relaciones calcio-magnesio-potasio, en un suelo de sabana sobre el crecimiento del sorgo granero (*Sorghum vulgare* Pers.). Tesis. Escuela de Agronomía, Universidad de Oriente, Jusepín, Monagas, Venezuela. 34 p.
- Mena, H. et al. 1981. Ensayos regionales de sorgo 1980. Fondo Nacional de Investigaciones Agropecuarias (FONAIAP), Centro Nacional de Investigaciones Agropecuarias (CENIAP). 23 p. (Multicopiado.)
- . 1982. Ensayos regionales de sorgo 1981. Fondo Nacional de Investigaciones Agropecuarias (FONAIAP). 23 p. (Multicopiado.)
- . 1983. Ensayos regionales de sorgo 1982. Fondo Nacional de Investigaciones Agropecuarias (FONAIAP). 32 p. (Multicopiado.)
- Sánchez, C. 1978. Algunas experiencias sobre el encalamiento de Ultisoles y Oxisoles de sabana. Cuaderno No. 2. Sociedad Venezolana de Ingenieros Agrónomos, Venezuela.
- Solórzano, P. R. 1971. Comportamiento de híbridos nacionales de sorgo granífero en suelos ácidos. Departamento de Fertilidad y Manejo de Suelos, Protinal, C.A., Venezuela.
- y Campos, G. 1971. Notas sobre algunas experiencias con el uso de caliza agrícola en suelo ácidos. *Revista Protinal XVIII (93):*121-123.

Efecto Potencial del Sorgo Granífero en los Sistemas Agropecuarios de las Regiones de Suelos Ácidos del Trópico Latinoamericano

*Carlos Seré y Rubén Darío Estrada**

Introducción

Durante las últimas décadas ha habido una rápida expansión del consumo de carnes de ave en América Latina, inducida por el crecimiento del ingreso per cápita y por los cambios tecnológicos ocurridos en el sector avícola que permitieron un incremento de la oferta a precios reales decrecientes.

Esto ha causado un notorio aumento de la demanda de granos para alimentación animal, principalmente los de maíz y sorgo. Buena parte de esta demanda adicional fue cubierta por importaciones crecientes, facilitadas por políticas de tasas de cambio sobrevaloradas y por una amplia disponibilidad de crédito internacional.

La reciente recesión ha revertido estas tendencias macroeconómicas y ha llevado a diseñar políticas más apropiadas para expandir la oferta interna. Dada la dotación de recursos de tierras de América Latina, donde hay 300 millones hectáreas de sabanas con suelos de buenas características físicas pero fuertes limitaciones respecto al pH y a la saturación de aluminio, se han iniciado programas de fitomejoramiento dirigidos a adaptar el cultivo del sorgo granífero a estas condiciones. Los primeros resultados parecen indicar que existe un buen potencial en términos biológicos. El presente trabajo analiza este potencial de producción de sorgo en términos económicos para las condiciones de las sabanas de los Llanos Orientales de Colombia. Se hace particular énfasis en las posibles interacciones entre el cultivo del sorgo y el sistema de producción predominante, que es fundamentalmente ganadero.

* Economistas, Programa de Pastos Tropicales, Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), Cali, Colombia.

Importancia del Sorgo en América Latina Tropical

Producción, área y rendimiento

En los Cuadros 1, 2 y 3 se presenta la información sobre la producción, el área y el rendimiento del sorgo en los países latinoamericanos. América del Sur tropical, a pesar de haber tenido un crecimiento sorprendente en el área cultivada y en la producción de sorgo en los últimos 20 años, ocupa un lugar muy inferior respecto a América Central y, en especial, a América del Sur templada. Todos los países han aumentado sus rendimientos pero las diferencias que existían en 1960 (300 kg/ha) han aumentado (1000 kg/ha) en favor de los países localizados en regiones más fértiles, quedando en último lugar los países tropicales de suelos ácidos. Estos resultados son un reflejo de la política de investigación en sorgo, que ha dado gran prioridad a materiales de alta producción en tierras secas y fértiles y muy baja prioridad a materiales adaptados a climas lluviosos. Fuera de Venezuela, en América Latina se encuentra poco sorgo sembrado en Oxisoles y Ultisoles.

Cuadro 1. Área sembrada con sorgo en América Latina y en el Caribe.

Región	Área (miles ha) en año:		
	1960/62	1970/72	1979/81
América del Sur tropical	28.7	105.6	634.0
América Central y el Caribe	334.0	1490.3	2072.4
América Latina tropical	362.7	1595.9	2706.4
América del Sur templada	774.7	2062.8	1862.5
Total, América Latina	1137.4	3658.7	4568.9

FUENTE: CIAT, 1983.

Cuadro 2. Producción de sorgo en América Latina y en el Caribe.

Región	Producción (miles t) en año:		
	1960/62	1970/72	1979/81
América del Sur tropical	41	238	1301
América Central y el Caribe	470	3138	5500
América Latina tropical	511	3376	6801
América del Sur templada	1317	3835	5680
Total, América Latina	1828	7211	12481

FUENTE: CIAT, 1983.

Cuadro 3. Rendimiento promedio del sorgo en América Latina y en el Caribe.

Región	Rendimiento (kg/ha) en año:		
	1960/62	1970/72	1979/81
América del Sur tropical	1429	2254	2052
América Central y el Caribe	1407	2105	2653
América Latina tropical	1408	2115	2512
América del Sur templada	1700	1859	3049
Total, América Latina	1607	1971	2732

FUENTE: CIAT, 1983.

Demanda y comercio internacional

En los Cuadros 4 y 5 se presenta la información sobre el comercio internacional del maíz y el sorgo, y un estimativo de la demanda del sorgo bajo diferentes alternativas de consumo y sustitución del maíz. América Latina, como un todo, es autosuficiente en la producción de granos pero existen grandes diferencias entre países, especialmente en la América tropical. América Central y el Caribe, a pesar del gran incremento en área y producción, presentan el mayor déficit comercial: tres millones de toneladas de maíz y dos millones de toneladas de sorgo anuales. América del Sur tropical figura con pocas importaciones de sorgo (686,000 t) pero importa más de tres millones de toneladas de maíz por año dedicadas principalmente a la fabricación de concentrados. Para los países con áreas importantes en sabanas bien drenadas de suelos ácidos (Brasil, Bolivia, Colombia y Venezuela) se requerirían cerca de cinco millones de hectáreas para producir los diez millones de toneladas que sustituirían tanto la importación de maíz y sorgo, como el consumo de maíz en los concentrados (Cuadro 5).

Hay que destacar que ésta es la demanda actual. Adicionalmente, se espera un fuerte incremento de la demanda potencial debido a la alta elasticidad ingreso de la carne de ave, al crecimiento de la población, y al aumento del ingreso per cápita. A pesar de los precios internos, sustancialmente por encima del precio internacional (Cuadro 6), la región es importadora neta de granos. La recesión internacional y los problemas agudos de balanza de pagos crean incentivos adicionales para la expansión de la oferta doméstica. Las zonas de frontera agrícola, como las sabanas, parece que tendrían buenas condiciones para contribuir sustancialmente a la oferta doméstica, si esta contribución es técnica y económicamente viable.

Cuadro 4. Disponibilidad de maíz y sorgo en América Latina y en el Caribe, en 1979-1981 (miles de toneladas).

	Maíz		Sorgo	
	Producción	Comercio internacional ^a	Producción	Comercio internacional ^a
América del Sur tropical	22635	3123	1301	686
América Central y el Caribe	14178	2968	5500	2120
América Latina tropical	36813	6091	6801	2806
América del Sur templada	10133	-5848	5680	-3604
Total, América Latina	46946	243	12481	-798

a. Exportaciones: (-); los otros datos son importaciones.

FUENTE: CIAT, 1983.

Cuadro 5. Potencial de expansión de la producción y el área sembrada de sorgo^a en países con áreas importantes de suelos ácidos, en 1979-1981.

Región	Alternativa 1 ^b		Alternativa 2 ^c		Alternativa 3 ^d	
	Producción (t)	Área (ha)	Producción (t)	Área (ha)	Producción (t)	Área (ha)
Brasil	174	87	1468	734	6969	3484
Bolivia	17	9	0	0	124	62
Colombia	488	244	189	95	884	442
Venezuela	530	265	1464	732	1591	795
Total	1209	605	3121	1561	9568	4783

a. Suponiendo un rendimiento de sorgo en suelos ácidos de 2 t/ha; todos los datos deben multiplicarse por mil.

b. Alternativa 1: Desplazar la producción actual a zonas ácidas.

c. Alternativa 2: Requerimientos para sustituir importaciones de maíz y sorgo. Equivalencia maíz/sorgo = 1:1.

d. Alternativa 3: Desplazar el área de producción actual de sorgo, sustituir la importación de sorgo y maíz y el 30% del maíz empleado en concentrados.

Cuadro 6. Maíz: precios al productor^a, a los fabricantes de concentrados, y precios de importación, en 1978-1980.

Precio	Precios (US\$/t) en 1978:			Precios (US\$/t) en 1979:			Precios (US\$/t) en 1980:		
	Al productor ^a	A fabricantes de concentrados ^b	De importación ^c	Al productor ^a	A fabricantes de concentrados ^b	De importación ^c	Al productor ^a	A fabricantes de concentrados ^b	De importación ^c
Brasil	128	108	128	120	126	152	—	209	106
Colombia	174	180	99	211	211	145	315	309	160
Venezuela	214	214	176	268	268	186	326	326	218

a. Tasa de cambio del Fondo Monetario Internacional (FMI) en 1978, 1979 y 1980.

b. Precios del maíz en octubre de 1978, 1979 y 1980 tomados del USDA (United States Department of Agriculture).

c. Precios tomados de la FAO para 1978, 1979 y 1980.

Sistemas de Producción en Regiones de Suelos Ácidos

La Figura 1 presenta las principales regiones de América del Sur tropical con sus características agroecológicas. Los países con área potencial para la producción de las nuevas variedades de sorgo tienen 655 millones de hectáreas de Oxisoles y Ultisoles, de las cuales sólo el 16% son utilizables para cultivos de sorgo; éstas corresponden a las sabanas bien drenadas con estaciones de verano bien definidas (Cuadro 7). Desde 1978 hasta 1982, el Programa de Pastos Tropicales del CIAT llevó a cabo un estudio de caracterización de los principales sistemas de producción existentes en estas sabanas bien drenadas de Colombia, Brasil y Venezuela (Vera y Seré, 1985). En estas regiones se seleccionaron 41 fincas para ser supervisadas durante un período de dos años. Un equipo multidisciplinario caracterizó las fincas principalmente ganaderas respecto a:

Recursos naturales: características fisiológicas, suelos y sus usos, especies de pastos nativos.

Nivel tecnológico: uso de sales minerales, división del hato por categorías, destete, etc.

Producción: reproducción y aumentos de peso.

Economía: flujo de ingresos y egresos, rentabilidad, etc.

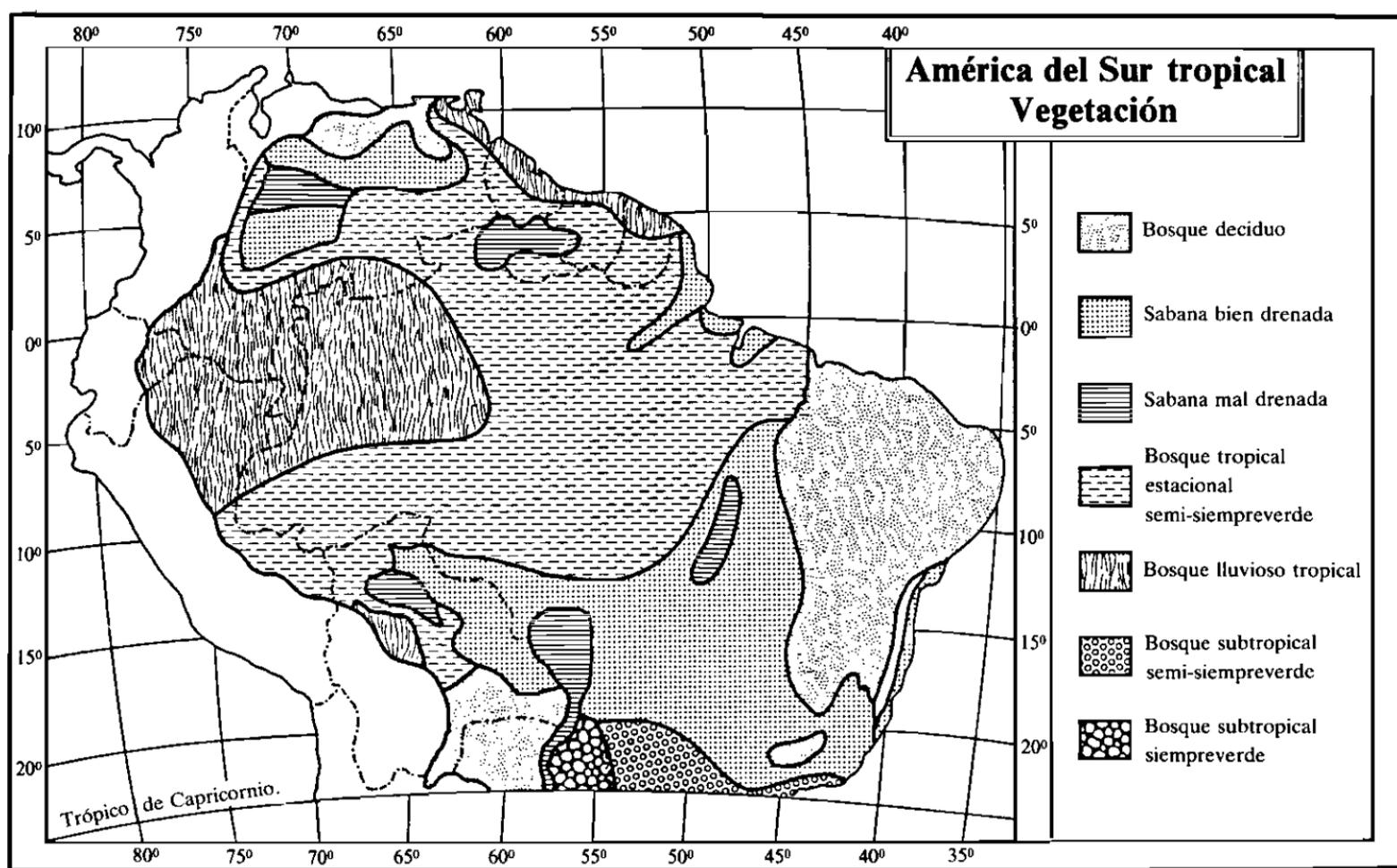
Las regiones estudiadas poseían dos estaciones bien definidas, una lluviosa y otra seca, pero diferían en el nivel de precipitación y en la longitud de la época seca. Las sabanas venezolanas son más secas (1000 mm/año) comparadas con las de Brasil

Cuadro 7. Formaciones agroecológicas en los principales países con suelos ácidos de América Latina.

País	Formación (millones ha)				
	Oxisoles y Ultisoles	Bosques tropicales	Otras formaciones	Sabanas mal drenadas	Sabanas bien drenadas ^a
Brasil	502	328	84	10	80
Bolivia	23	19	1	3	0
Colombia	73	58	4	3	8
Venezuela	57	38	1	4	14
Total	655	443	90	20	102

a. Área potencial para los sorgos adaptados a suelos ácidos.

FUENTE: Estimaciones del CIAT basadas en Cochrane, 1985 y FAO-UNESCO, 1975.



(1800 mm/año) y Colombia (2000 mm/año). La estación seca es más corta en Colombia y Venezuela (4 meses) que en la región del Cerrado Brasileño (5 meses) donde adicionalmente las precipitaciones discontinuas de la época lluviosa ('veranicos') requieren que el material introducido esté bien adaptado a las condiciones del suelo para poder sobrevivir extrayendo agua a mayores profundidades.

Las características fisiográficas de las fincas mostraban que la sabana bien drenada es el principal componente del área, seguida por las partes 'bajas' y los montes de galería. En las sabanas bien drenadas, a pesar de lo uniforme del ecosistema, existían grandes variaciones en términos de suelos entre países y aún entre los terrenos de una misma finca. En el Cuadro 8 se presentan las principales características químicas del suelo (pH, P, K, saturación de aluminio). Colombia presenta los suelos más ácidos con un mayor porcentaje de saturación de aluminio que requiere de 1.7 t/ha de cal para establecer las variedades de sorgo adaptadas a suelos ácidos. En el Brasil no hay limitación del suelo sería para sembrar las nuevas variedades y, en general, el nivel bajo de fertilidad era más importante que la acidez o la saturación de aluminio. Venezuela presenta suelos con saturación de aluminio donde se podría cultivar sorgo en forma permanente; en promedio, el nivel de fertilidad es un poco superior a los de Brasil y Colombia, pero en todo el ecosistema de sabana bien drenada se requieren aplicaciones de nitrógeno, fósforo y potasio para cada cosecha (Cuadro 8).

En el Cuadro 9 se presenta una comparación entre los sistemas de producción de las diferentes regiones estudiadas. En general, son sistemas extensivos con más de 1500 ha de área total, localizados en zonas de frontera agrícola y orientados hacia la cría y el levante de animales. El tamaño promedio del hato es de 550 animales que disponen de 0.59 ha de pasto sembrado por animal y con producciones de carne que varían entre 12 y 36 kg/año y 54 a 65 kg/UA por año. La vegetación nativa es el recurso forrajero más importante para la alimentación del hato pero su importancia varía entre las regiones y según el tamaño de la finca. La rápida expansión del cultivo del arroz en Brasil impulsó la siembra de gramíneas a un ritmo superior al del crecimiento del hato.

La orientación más comercial de la ganadería de Venezuela (venta de leche) y de Brasil (venta de terneros machos destetos) está asociada con un mayor desarrollo de la infraestructura que

Cuadro 8. Principales características de los suelos de las fincas estudiadas.^a

Característica	Brasil			Colombia			Venezuela		
	Promedio	F1	F2	Promedio	F1	F2	Promedio	F1	F2
pH	5.43	5.84	4.99	4.50	4.70	4.30	4.90	5.35	4.82
P (ppm)	3.31	5.87	0.38	2.10	1.30	2.70	6.34	1.53	9.61
K (meq/100 g)	0.14	0.14	0.09	0.05	0.03	0.04	-	-	-
Saturación de aluminio (%)	13.96	0.30	46.70	88.00	72.00	90.00	30.00	0.00	86.00

a. F1 = la finca con menor saturación de aluminio; F2 = la finca con mayor saturación de aluminio.

Cuadro 9. Principales características físicas de los sistemas de producción estudiados en varias regiones.

Característica	Brasil (1980)	Colombia (1978)	Venezuela (1980)
Número de fincas	12	16	13
Distancia al mercado ^a (km)	147	300	50
Tamaño promedio de la finca (ha)	2578	2901	1533
Mano de obra (EH)	7.0	3.2	4.1
Tamaño del hato (UA)	538	526	685
Proporción de vacas (%)	40	41	39
Pasto sembrado (ha)	774	181	195
Cultivos			
Sorgo: área (ha)	-	0	18 ^b
fracción de la finca (%)	-	-	2
Arroz: área (ha)	126	0	-
fracción de la finca (%)	5	-	-
Producción ganadera:			
kg/ha por año	15	12	36
kg/UA por año	65	54	55
Producción de cultivos:			
kg/ha cultivada	2138	-	-

a. Distancia de la finca más cercana a un centro poblado con más de 200,000 habitantes.

EH = equivalente-hombre.

b. Rastrojos de cultivos sembrados en 1979.

FUENTE: Vera y Seré, 1985.

repercute positivamente en la adopción de nuevos sistemas integrados con cultivos.

En las fincas de Colombia estudiadas no se encontraron siembras comerciales de ningún cultivo y la introducción de pastos se realizó sin cultivo intercalado. En Brasil, la finca promedio tenía, en el año del estudio, 126 ha de arroz que representaban el 5% del área total de la finca; en estas fincas los cultivos eran utilizados para establecer los pastos y en ninguna de ellas había cultivos en forma permanente en el mismo lote por más de dos años. En Venezuela, en el año del estudio, se retiraron los subsidios a los fertilizantes y los agricultores dejaron de sembrar el cultivo tradicional de la zona, que era el sorgo. En el año inicial del estudio había 18 ha, en promedio, de rastrojo de sorgo.

Siembra de cultivos en forma definitiva, o para introducir pasturas, requiere una modificación sustancial en la estructura

administrativa y afecta en forma importante los parámetros económicos y, en especial, el flujo de ingresos y egresos de la finca. Esto es evidente en la diferencia entre los parámetros de Brasil, con abundantes cultivos, y los de Colombia y Venezuela, donde no hay cultivos (Cuadro 10).

La importancia relativa de la zona de estudio, dentro del país, lo determina la disponibilidad de carreteras y la distancia al centro poblado más cercano. En los Llanos Colombianos vive menos del 1% de la población total del país, comparado con el 18% que habita en los Cerrados de Brasil y en los Llanos de Venezuela. La disponibilidad de tierra fértil en otras regiones del país determina en gran parte los esfuerzos para desarrollar esa zona; esta política es muy clara en Venezuela y Brasil, pero muy limitada en el caso colombiano.

Cuadro 10. Principales características económicas de los sistemas estudiados (US\$/ha).

Característica	Brasil	Colombia	Venezuela
Inversión			
Total	391.00	72.00	602.00
Maquinaria	24.00	3.00	66.00
Ingreso bruto			
Ganado	20.00	7.00	40.00
Cultivos	45.00	-	-
Insumos			
Sales y salud animal	0.97	0.87	1.18
Abonos	8.58	0.02	1.02
Combustibles	3.38	0.00	0.00
Otros	9.32	0.11	0.75
Total	22.25	1.00	2.95
Mano de obra	6.95	1.25	9.65
Depreciaciones	5.56	0.97	14.21
Costos totales	34.76	3.22	26.81

FUENTE: Vera y Seré, 1985.

Potencial del Sorgo en estos Sistemas de Producción

Para determinar el potencial del sorgo, se estima la producción comercial en 2 t/ha, productividad normalmente alcanzada con las nuevas variedades en las pruebas de comportamiento en el

campo. La eficiencia económica se determina según los precios de insumos y productos existentes en los Llanos Orientales de Colombia en 1984, suponiendo que si esta alternativa es atractiva en Colombia, será más ventajosa en Brasil y en Venezuela, países con una ventaja comparativa para producir sorgo en terrenos ácidos. Esta ventaja comparativa se debe al mayor desarrollo de la infraestructura en las regiones de suelos ácidos, menores precipitaciones, poca disponibilidad de zonas fértiles, y una gran demanda por granos para alimentar una industria avícola en expansión.

El maní, la yuca y el arroz son cultivos bien adaptados a condiciones de acidez del suelo, pero los dos primeros son poco comerciales en zonas de frontera agrícola y el arroz está más adaptado a zonas denominadas 'secano favorecido', donde ocurren precipitaciones superiores a 2000 mm anuales. La productividad obtenida con el arroz permitiría a este cultivo competir con el sorgo en ecosistemas de sabana bien drenada, pero la presencia de enfermedades en las hojas del arroz durante el período vegetativo restringen estas posibilidades.

Se analizará la factibilidad económica de la producción de sorgo bajo dos condiciones: como un cultivo semestral, y como un complemento de la introducción de pastos y de la alimentación del ganado con el rastrojo en épocas críticas.

Dada la disponibilidad de cal en varias regiones, parece pertinente preguntarse qué tan conveniente es, económicamente, utilizar germoplasma más adaptado, aunque de menor producción, cuando se puede obtener una producción razonable con niveles más altos de cal y variedades ya existentes sembradas en terrenos fértiles. Ensayos realizados (Salinas, 1975) en el Centro de Investigaciones de Maíz y Sorgo en Sete Lagoas (Brasil) demostraron que el germoplasma adaptado producía lo mismo cuando se utilizaban niveles de cal superiores a las 4 t/ha, y que su sistema radicular tenía sólo 40 cm/100 cm³ de suelo. A medida que disminuía el nivel de cal aplicada y se la localizaba más superficialmente, las variedades adaptadas eran capaces de desarrollar un sistema radicular hasta los dos metros de profundidad, lo que hacía más eficiente la extracción de agua y nutrientes en un perfil mayor del subsuelo.

La característica principal del germoplasma adaptado es la eficiencia que tiene para extraer agua del subsuelo en épocas de 'veranicos' y no tanto la tolerancia a la saturación en la época

lluviosa uniforme. Esta característica es muy importante por las siguientes razones:

permite utilizar niveles bajos de cal;

permite sembrar con una preparación del suelo sencilla, incorporando la cal hasta los 15 cm de profundidad en el suelo. Esta preparación es suficiente para el establecimiento de pastos en sabana;

se obtiene una cosecha de menor rendimiento pero con menor riesgo;

podría ser más eficiente para extraer nutrimentos como P, K y Mg, que son importantes en la producción y son los más costosos; y

en regiones como los Llanos Orientales de Colombia la cal es costosa.

El Sorgo como Cultivo Semestral

Para evaluar la competitividad del sorgo como cultivo semestral en los Llanos Orientales, se prepararon los presupuestos comparativos para la producción de sorgo en terreno fértil y en terreno ácido (Cuadro 11). El presupuesto del terreno fértil corresponde a los insumos y precios utilizados en el Valle del Cauca, y el del terreno ácido a los requerimientos de insumos y a los precios de una finca localizada 40 km al este de Puerto López, en los Llanos Orientales.

Las principales diferencias entre los dos presupuestos están dadas por los siguientes factores:

Fertilizantes

Las variedades de sorgo adaptadas a suelos ácidos se comportan bien hasta una saturación de aluminio de 60%. En las fincas de los Llanos Orientales de Colombia se encontraron saturaciones, en promedio, de 88% y fue necesario aplicar 1740 kg/ha de cal para reducir la saturación de aluminio al porcentaje requerido. Para determinar la cantidad de cal se utilizó la fórmula:

$$CR = 1.8 [Al - SAR (Al + Ca + Mg)/100]$$

donde:

- CR = cal requerida (t/ha)
 SAR = saturación de aluminio requerida (%)
 Al, Ca, Mg = miliequivalente (meq) de cada elemento por 100 g de suelo

Dicha fórmula fue utilizada por Cochrane (1980) en los Llanos colombianos. Se supuso que con una aplicación se podrían obtener tres cosechas de sorgo en forma continua sin necesidad de realizar enmiendas.

El nivel de nitrógeno aplicado en el Valle del Cauca se consideró adecuado para los Llanos; en éstos, la fertilidad natural

Cuadro 11. Presupuesto comparativo para la producción de sorgo en terrenos fértiles y en suelos ácidos.

Rubros de costos	Valor (US\$/ha) en suelo:	
	Fértil ^a (Rend. = 2 t/ha)	Acido (Rend. = 3 t/ha)
Mano de obra		
– Con maquinaria (8.5 h x US\$10/hora)	85.0	–
(8.5 h x US\$11/hora)	–	93.5
– Manual (20 jornal x US\$5/jornal)	100.0	100.0
Insumos		
– Semilla (16 kg x US\$0.40/kg)	6.4	–
(8 kg x US\$0.80/kg)	–	6.4
– Fertilizantes		
Cal (580 kg x US\$0.03/kg)	–	17.4
N (46 kg x US\$0.65/kg)	29.9	29.9
P ₂ O ₅ (13 kg x US\$0.38/kg)	–	4.9
K ₂ O (40 kg x US\$0.40/kg)	–	16.0
– Control de malezas (3.5 lt x US\$3.5/lt)	12.2	12.2
– Control de insectos (1.0 lt x US\$4.7/lt)	4.7	4.7
Cosecha (1 hora x US\$40/hora)	40.0	40.0
Servicios (administración, asistencia técnica)	23.0	23.0
Arriendo	120.0	12.0
Empaques (US\$0.5/unidad de 60 kg)	25.0	17.0
Trasporte (US\$5/t por 100 km) ^b	15.0	30.0
Intereses (3 meses sobre el gasto total)	27.7	24.4
Total (US\$/ha)	488.9	431.2

a. Rend. = rendimiento. Los datos para suelo fértil son de CVC (1982) y de estimaciones de los autores.

b. La región de suelos ácidos está a 300 km del mercado.

se asemejó a la del Valle aplicando 13 kg/ha de fósforo y 40 kg/ha de potasio, además del nitrógeno.

Arriendo

El valor del arriendo es un estimado de la disponibilidad de tierra buena; en el presupuesto inicial se consideraron US\$120 para la tierra fértil y US\$12 para tierras ácidas, por semestre. El primer valor es el precio normal cobrado en el Valle del Cauca y el segundo corresponde al costo de oportunidad de una tierra explotada en forma extensiva en los Llanos colombianos con una carga de 0.2 UA/ha. A pesar de la gran diferencia existente entre los dos arriendos, ésta disminuía a más de la mitad cuando se consideraban las enmiendas a la fertilidad natural y el transporte de la producción a los centros de consumo localizados en las tierras fértiles. La mayor proximidad a los centros de consumo en Venezuela y Brasil, así como la ausencia de tierras de alta fertilidad subutilizadas, incrementan el atractivo de producir sorgo en suelos ácidos en estos dos países.

Costo del transporte

En los terrenos fértiles los centros de consumo están, en promedio, a 100 km de las zonas cultivadoras de sorgo. Esta distancia aumenta a 300 km en el caso del llano colombiano, diferencia que representa US\$10/t los cuales, junto con el transporte de combustible e insumos, aumenta los costos de producción en las zonas de frontera.

Los costos de maquinaria, mano de obra, semilla, control de malezas y de insectos, así como el costo de la cosecha, no varían sustancialmente de una región a otra porque consideramos que estos valores dependen más del lote en sí (tipo de suelo, población de malezas, etc.) después de varios ciclos de cultivo, y no de la zona en general o de la adopción de una variedad determinada.

Partiendo de presupuestos comparativos, se estimó el 'rendimiento equivalente', y se definió como la producción de sorgo por hectárea en terreno ácido que tendría el mismo costo de una tonelada del grano producida en terreno fértil.

En la Figura 2 se presentan los resultados obtenidos al realizar el análisis de sensibilidad respecto a la disponibilidad de tierra fértil (valor del alquiler) y a su productividad.

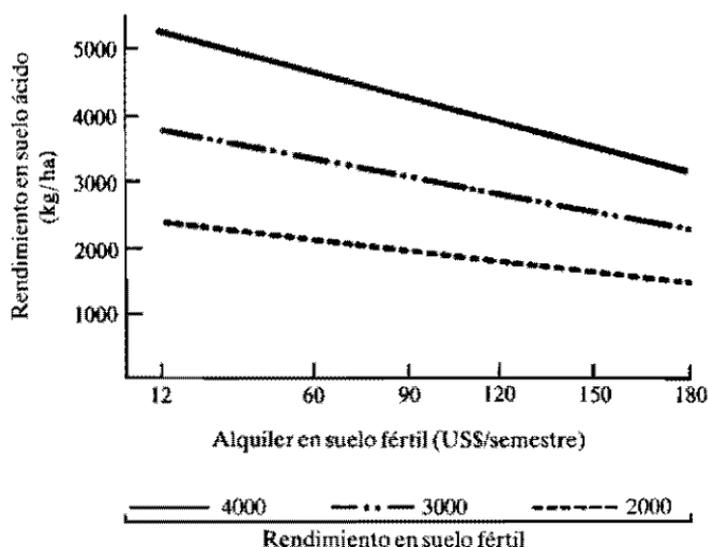


Figura 2. Rendimientos equivalentes de sorgo en suelos fértiles y suelos ácidos. Estos rendimientos hacen competitiva la producción de sorgo en terrenos ácidos, según el costo de oportunidad de la tierra cultivada actualmente y el rendimiento logrado en ésta. Costo de oportunidad de la tierra ácida: US\$12/semestre.

Si en el suelo ácido se obtienen rendimientos de sólo 2 t/ha, esta actividad sería competitiva solamente si la disponibilidad de tierra fértil fuera baja (más de US\$100/semestre) y su productividad muy pobre (menos de 2.5 t/ha). Con los costos de alquiler normalmente cobrados en el Valle del Cauca (US\$120/semestre) y con producciones normales de 3 t/ha, sería imposible competir a menos que se produjeran 3000 kg en terrenos ácidos de frontera. Con esta producción se pagan los costos de transporte y de fertilizantes en terrenos ácidos y se eliminan las diferencias de arriendo. Bajo estas condiciones, los Llanos Orientales sólo podrían competir unos pocos años después de arar la sabana si los costos de preparación del terreno y de control de malezas e insectos permanecieran bajos.

Si observamos los presupuestos comparativos, vemos que en terreno fértil más del 85% de los costos totales son independientes del nivel de rendimiento (preparación del terreno, mano de obra, semilla, fertilizantes, control de malezas e insectos, servicios y arriendo), lo cual estimula a los productores a aumentar el rendimiento como único mecanismo de reducir los costos por tonelada (Figura 3) aumentando así la demanda causada por la escasez de tierra fértil y por la disponibilidad de variedades de alto rendimiento.

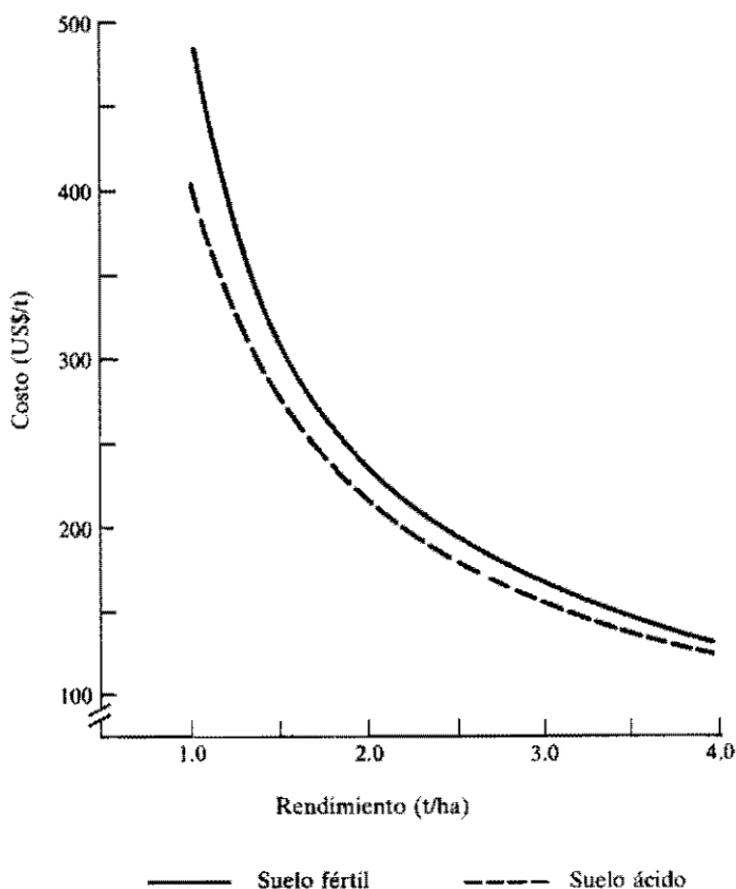


Figura 3. Costos de producción según niveles de rendimiento obtenidos, tanto en suelos ácidos como en fértiles.

A nivel internacional, los precios de los granos han bajado en términos reales desde US\$240 en 1950 a US\$126 en 1980 (IBRD, 1982) y los países latinoamericanos que han podido competir son aquéllos que aumentaron el rendimiento del sorgo por encima de 3 t, promedio nacional. El aumento real de los precios del combustible reduce el incentivo de producir en las zonas de frontera agrícola y de intensificar el uso de la tierra fértil ya cultivada cerca de los sitios de mercado. La nueva tecnología tendría aplicación en terrenos ácidos cercanos a los centros poblados, como es el caso de Venezuela y Brasil y de algunas pequeñas áreas en Colombia.

El Cultivo del Sorgo como Complemento del Establecimiento de Pasturas

Con la producción promedio obtenida hasta el momento (2 t/ha) no parece factible la introducción en gran escala del cultivo del sorgo a las sabanas bien drenadas de Colombia (la Altillanura), a menos que aquél complemento o utilice insumos existentes en los sistemas actuales de producción, elevando así la rentabilidad del sistema en general. En esta sección se estudiará la factibilidad económica de introducir el sorgo utilizando la fertilización dada a los pastos, sin aplicar control de malezas, y complementando la producción forrajera de la finca mediante el uso estratégico de los rastrojos de sorgo. Para tal fin, se utilizan los resultados experimentales obtenidos en el seguimiento, por seis años, de una finca en los Llanos Orientales en la cual se introdujeron pastos mejorados en 5% del área para ser usados estratégicamente por el hato de cría. Mediante suplementación de las vacas de cría en el período crítico posterior al parto se buscaba adelantar la reconcepción de esas vacas. Estas pasaban luego a consumir sabana. De esta manera, con un 5% del área sembrada con pastos mejorados, en cuatro años se logró pasar la tasa de natalidad de 50% a 57%, el peso de los terneros destetos de 109 a 162 kg, y la carga animal total de la finca de 0.13 UA/ha a 0.24 UA/ha. En términos económicos, la inversión en pasturas y ganado adicional generó un retorno anual de 35% si se supone que la persistencia de la pastura es de 12 años con refertilizaciones cada tres años.

Para evaluar la posible contribución de un cultivo de sorgo asociado, se presupuestó el costo adicional que esto implicaría por hectárea (Cuadro 12) y se incluyó en el flujo de caja de la inversión, suponiendo que el rendimiento del sorgo era de 2 t/ha y su precio de US\$160 por tonelada, en la finca. El impacto de esto, en términos de flujo de caja, se presenta en la Figura 4.

Las principales ventajas de utilizar sorgo como cultivo pionero son:

- La producción de sorgo utiliza el 86% de los insumos empleados en la siembra de pastos; los costos adicionales (US\$205/ha) corresponden a la cal, los costos de cosecha, el empaque, el transporte, y la administración (Cuadro 12); estos costos se recuperan, en su gran mayoría, cuando se obtiene una buena cosecha. Hay un bajo riesgo en la operación dado que los principales costos ocurren en la cosecha. Si el rendimiento es

Cuadro 12. Presupuesto comparativo de la siembra de sorgo solo y de sorgo más pasto.

Rubros de costos	Valor (US\$/ha) en:		
	Pasto	Sorgo más pasto	Inversión extra
Mano de obra – Con maquinaria (8.5 h x US\$11/hora)	93.5	93.5	0.0
– Manual (10 jornal x US\$5/jornal)	50.0	50.0	0.0
Insumos: – Semilla			
• Sorgo (8 kg x US\$0.80/kg)	–	6.4	6.4
• <i>A. gayanus</i> (5 kg x US\$6.00/kg)	30.0	30.0	0.0
• <i>S. capitata</i> (2 kg x US\$7.00/kg)	14.0	14.0	0.0
– Fertilizantes			
Cal (1400 kg x US\$0.03/kg)	–	42.0	42.0
N (46 kg x US\$0.65/kg)	–	29.9	29.9
P ₂ O ₅ (50 kg x US\$0.38/kg)	19.0	19.0	0.0
K ₂ O (22 kg x US\$0.40/kg)	8.8	8.8	–
– Control plagas y enfermedades (1.0 lt x US\$4.70/lt)	–	4.7	4.7
Cosecha (1 h maquinaria x US\$40/h)	–	40.0	40.0
Servicios (administración y asistencia técnica)	–	23.0	23.0
Empaques (US\$0.5/unidad de 60 kg)	–	17.0	17.0
Trasporte (US\$5.0/t x 100 km)	–	30.0	30.0
Intereses (% sobre capital promedio)	13.0	25.0	12.0
Total	228.3	433.3	205.0

muy bajo, se evitan estos costos pastoreando el sorgo en vez de cosecharlo.

- La producción del sorgo mejora sustancialmente el flujo de caja de la inversión hecha en pasturas, durante los primeros años.
- La rentabilidad marginal de los pastos asociados con el sorgo se incrementa de 34% a 52% anualmente, para producciones que fluctúan entre 1.3 y 2.5 t/ha de grano (Figura 5).
- Al preparar por primera vez el suelo, se produce una mineralización de los nutrientes y se aportan nitrógeno y potasio.

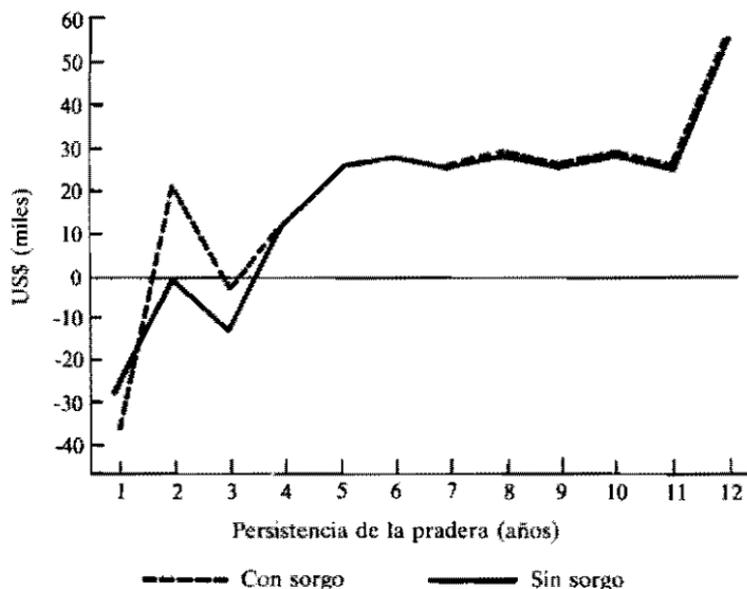
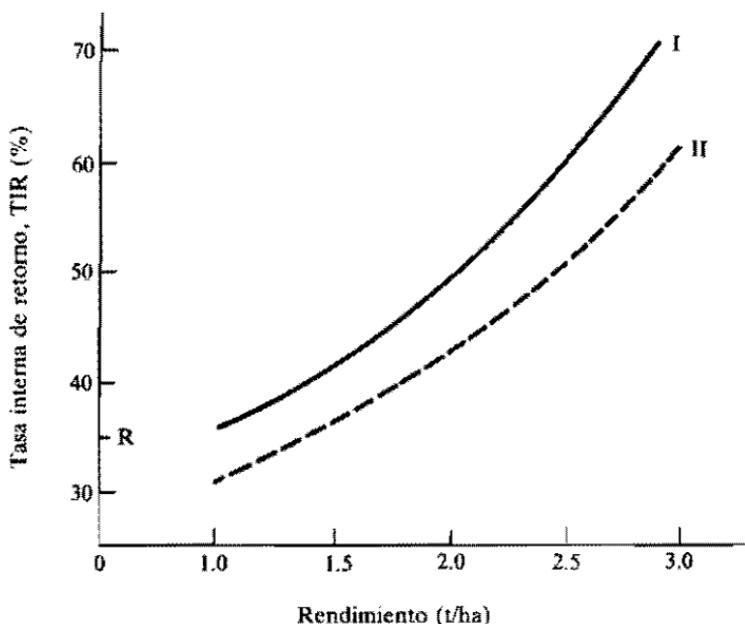


Figura 4. Flujo marginal de efectivo en el establecimiento de una pastura mejorada. Finca de un estudio de casos con 154 ha de pasto sembrado; 114 ha se sembraron en el primer año y 40 ha en el segundo año.

Si este aporte es suficiente para producir el sorgo, la rentabilidad pasaría de 34% a 60% con producciones de 1.0 a 2.5 t/ha (Figura 5).

- Dependiendo de la variedad, el rastrojo de sorgo puede aportar unas 5 t/ha de MS con un contenido de energía superior al de la sabana nativa. Las vacas que tengan bajo peso inicial pastorean el rastrojo como un banco de energía para la sabana, lo que les permitiría lograr aumentos superiores a los 250 g/día; esto reduciría el tiempo requerido para lograr pesos adecuados utilizando el pasto en forma estratégica y no continua.
- El establecimiento del pasto se financia con préstamos de corto plazo como los que se obtienen para cultivos comerciales con duración inferior al año. Esta posibilidad impulsaría el establecimiento de pastos mejorados, no sólo por disponer de una financiación más ágil, sino por la mejora sustancial en el flujo de efectivo que se produce con el cultivo del sorgo.
- Las simulaciones indicaron que si la persistencia de las pasturas de gramíneas y leguminosas es inferior a seis años, no era factible tener rentabilidades adecuadas, especialmente por el



I = Rentabilidad de la siembra de pasto y sorgo considerando que la mineralización aporta la totalidad de N y K.

II = Rentabilidad de la siembra de pasto y sorgo sin considerar mineralización.

Figura 5. Rentabilidad marginal de los pastos sembrados, excluyendo el sorgo como cultivo pionero. R = Rentabilidad del proyecto sin siembra de sorgo.

flujo negativo de los primeros años. La introducción de pastos junto con cultivos permitiría obtener un retorno rentable si la pastura mejorada sólo persistiera cuatro años y la producción de sorgo fuera de 2 t/ha. Con esta alternativa se ampliarían las posibilidades de introducir mezclas de gramíneas y leguminosas, más productivas aunque de menor persistencia, o de sustituir praderas tan pronto como decrece su potencial al desaparecer la leguminosa.

Una vez logrados los materiales de sorgo adaptados a suelos ácidos, las principales limitaciones para establecer esta asociación serían:

- Infraestructura regional para el manejo del sorgo (maquinaria para la cosecha, transporte, almacenamiento).

- Daños causados por pájaros debido a la limitada área de estos lotes en relación con la región.
- Falta de investigación agronómica en relación con densidades y fechas de siembra, y con niveles de fertilización; investigando se manejaría en forma eficiente la competencia entre el sorgo, las gramíneas y las leguminosas forrajeras.

Conclusiones

Se pueden extraer las siguientes conclusiones del estudio anterior:

1. Con rendimientos de 2 t/ha no parece factible sembrar el sorgo como cultivo permanente en los terrenos ácidos de la Altillanura de los Llanos Orientales de Colombia.
2. El uso del sorgo como cultivo pionero, complementario en la siembra de pastos mejorados, es muy atractivo. Soluciona problemas biológicos y reduce las desventajas económicas (flujo de efectivo negativo durante varios años y rentabilidad media) del sistema de introducción de pasturas hasta ahora utilizado.
3. En este sistema combinado agrícola-pastoril, producciones de sorgo superiores a 1.5 t/ha hacen atractiva la inversión en pastos mejorados de los cuales permiten utilizar germoplasma menos adaptado a suelos ácidos.
4. La posibilidad económica de sembrar sorgo cada cuatro años permite utilizar asociaciones de gramíneas y leguminosas menos persistentes pero más productivas.
5. Brasil y Venezuela tienen ventaja comparativa con respecto a Colombia para producir sorgo en suelos ácidos. Esta ventaja la determinan: la localización de la región con suelos ácidos respecto a los centros poblados, la menor saturación de aluminio, la menor disponibilidad de terreno fértil, y los mayores precios internos.
6. Estos resultados son consistentes con el proceso de introducción de pasturas sembradas observado en países tanto tropicales como templados. La siembra masiva de pasturas está siempre asociada con la existencia de un cultivo rentable, p.e. arroz en el Cerrado brasileiro o trigo en la pampa argentina.

7. Este análisis *ex ante* indica un considerable potencial para el sorgo adaptado a suelos ácidos que hará más dinámicos los sistemas extensivos actualmente predominantes. Hace falta un esfuerzo de investigación básica y aplicada para hacer efectivo este potencial.
8. Dada la relación de precios entre los costos fijos por hectárea de preparación de la tierra, de siembra, y particularmente de cosecha del sorgo, y dado el precio de la cal así como el precio del sorgo en la región, parece más importante aumentar el rendimiento del cultivo que lograr su adaptación a niveles más altos de saturación de aluminio. La evidencia preliminar parece indicar que convendría enfocar la investigación al aumento del rendimiento con niveles del 50% de saturación de aluminio. En Brasil y Venezuela hay grandes áreas con estas características para la producción potencial de sorgo. En los Llanos Orientales de Colombia, reducir la saturación de aluminio a este nivel requiere cantidades limitadas de cal, dado el bajo poder amortiguador ('bófer') de los Oxisoles predominantes. Dada la gran extensión de tierras disponibles en relación con las áreas necesarias de sorgo para abastecer el mercado interno, parece racional esperar que se asignen a este cultivo tierras de menor saturación de aluminio.
9. Variedades de sorgo de alta tolerancia a la toxicidad por aluminio pueden tener un papel importante en el establecimiento de pasturas, asociadas a éstas. Dada la existencia de pasturas adaptadas a altos niveles de saturación de aluminio, es más importante la reducción de la inversión inicial en encalado. Es necesaria la investigación agronómica aplicada para evaluar, a nivel de campo, la viabilidad de esta promisoriosa estrategia.

Referencias

- CIAT (Centro Internacional de Agricultura Tropical). 1983. Trends in CIAT commodities: Internal document, economics 1.8. Cali, Colombia.
- Cochrane, T. T. 1980. The methodology of CIAT's land resource study of tropical America. En: Buroff, P. G. y Morrison, D. B. (eds.). Proceedings of the Fourth International Symposium on Machine Processing of Remotely Sensed Data and Soil Information Systems and Remote Sensing and Soil Survey. IEEE Catalog No. 80. Purdue University, West Lafayette, Indiana, E.U. p. 227-233.

- ; Salinas, J. G. y Sánchez, P. A. 1980. An equation for liming acid mineral soils to compensate crop aluminum tolerance. *Trop. Agric.* 57:(2)133:140.
- ; Sánchez, L.G.; de Azevedo, L. G.; Porras, J. A. y Garver, C. L. 1985. Land in tropical America. La tierra en América tropical. A terra na América tropical. Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), Cali, Colombia, y Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – Centro de Pesquisa Agropecuária dos Cerrados (EMBRAPA - CPAC), Planaltina, D.F., Brasil. Cali, Colombia. 146 p.
- CVC (Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca). 1982. Manual de costos de producción agropecuaria. Informe CVC-83-1. Oficina de Planeación, Cali, Colombia.
- FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations). [1981]. Monthly bulletin of statistics, 1978, 1979, 1980. Roma, Italia.
- y UNESCO (United Nations Education, Science, and Culture Organization). 1975. Soil map of the World. Volume IV-1, París, Francia.
- FMI (Fondo Monetario Internacional). [1981]. Estadísticas financieras internacionales. Octubre 1978, 1979, 1980. Washington, D.C., E.U.
- IBRD (International Bank for Reconstruction and Development). 1982. Commodity trade and price trends. Washington, D.C., E.U.
- Salinas, J. G. 1975. Residual effects of lime rates and depth of incorporation. En: *Agronomic-economic research on tropical soil; annual report of 1975*. Soil Science Department, North Carolina State University, Raleigh, NC, E.U.
- USDA (United States Department of Agriculture). 1981. Foreign agricultural service. Boletín, 26 mayo 1981. Washington, D.C., E.U.
- Vera, R. R. y Seré, C. 1985. Los sistemas de producción pecuaria extensiva del trópico sudamericano; análisis comparativo. En: CIAT (Centro Internacional de Agricultura Tropical). *Sistemas de producción pecuaria extensiva: Brasil, Colombia, Venezuela*. CIAT, Cali, Colombia. p. 431-450.

MEJORAMIENTO Y SELECCION

Técnicas Efectivas de Selección para Buscar Tolerancia a la Toxicidad del Aluminio

R. H. Howeler*

Introducción

Se ha estimado (Sánchez, 1981) que el 42% del área terrestre en los trópicos, aproximadamente 2050 millones de hectáreas, está ocupada por Oxisoles, Ultisoles o Inceptisoles. En la América tropical, estos órdenes edáficos ocupan 1019 millones de hectáreas (72.6% del área). Estos suelos están caracterizados generalmente por una acidez extrema y por bajos niveles de nutrientes disponibles. Por esta razón están subutilizados y forman uno de los últimos recursos de tierra hacia los cuales se puede expandir la producción agrícola.

Sin embargo, la mayoría de las especies cultivadas es susceptible a altas concentraciones de aluminio (Al), una de las mayores limitantes de estos suelos. Este problema se puede superar, ya sea por el encalamiento del suelo para neutralizar el aluminio intercambiable, o mediante una selección de especies y variedades tolerantes a los altos niveles de Al. La segunda alternativa es más práctica, ya que la aplicación de grandes cantidades de cal es muy costosa y puede alterar solamente el contenido de Al de las capas superiores del suelo, ocasionando la formación de sistemas radicales poco profundos en los cultivos sensibles al aluminio. La selección de cultivos y variedades tolerantes al aluminio permite obtener a menudo buenos rendimientos con una mínima aplicación de cal; ésta sirve principalmente como una fuente de calcio (Ca) y magnesio (Mg).

La Figura 1 muestra la respuesta de varios cultivos a la aplicación de cal, en Carimagua. Aunque el caupí y la yuca fueron muy tolerantes a la acidez del suelo y alcanzaron el 40% de sus rendimientos máximos sin aplicaciones de cal, el caupí produjo

* Científico de Suelos, Programa de Yuca, Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), Cali, Colombia.

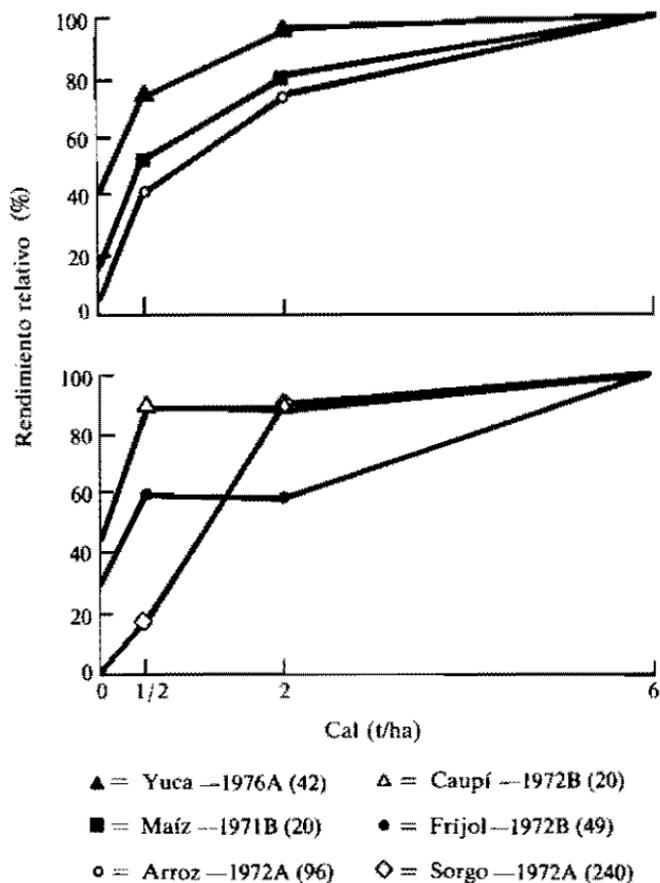


Figura 1. Respuesta de seis cultivos a la aplicación de cal en Carimagua. En las convenciones, A y B indican primero y segundo semestre del año de la prueba, y las cifras entre paréntesis indican el número de variedades o líneas mejoradas de la prueba.

casi el rendimiento máximo con una aplicación de 0.5 t/ha de cal; la yuca requirió 2 t/ha. El sorgo y el arroz (variedades enanas) fueron altamente susceptibles a la acidez del suelo, mientras que los frijoles y el maíz fueron moderadamente susceptibles.

Con la expansión, en la última década, de los centros internacionales de investigación agrícola (cada uno con grandes colecciones de germoplasma), ha aumentado notablemente el interés por evaluar la tolerancia al aluminio de ese germoplasma, especialmente en América Latina donde el porcentaje de suelos ácidos es grande. Además, en América del Norte varios mejoradores de cultivos de clima templado han comenzado a incorporar la

tolerancia al aluminio en variedades de altos rendimientos para regiones de suelos ácidos. De esta forma, tanto en los trópicos como en los climas templados se han desarrollado varias técnicas de selección para evaluar la tolerancia al aluminio de un gran número de variedades o líneas de mejoramiento. Algunas de las técnicas más efectivas se describirán a continuación, con alguna indicación de sus ventajas y desventajas.

Técnica de la Solución Nutritiva

Para los fitomejoradores, quienes tienen que evaluar grandes cantidades de materiales, de los cuales hay a menudo muy poca cantidad de semilla, la técnica de la solución nutritiva tiene muchas ventajas. Es rápida, requiere poca semilla, y muchas veces no es destructiva; los mejores materiales se pueden trasplantar posteriormente al campo para comprobar su resistencia o tolerancia a las enfermedades e insectos, así como su potencial de rendimiento.

La principal desventaja es que las soluciones nutritivas consumen mucho tiempo y son difíciles de manejar, ya que el efecto tóxico del aluminio está influenciado grandemente por la temperatura, el pH, y las concentraciones de Al, fósforo (P), Ca, Mg, y potasio (K). A medida que las plantas absorben los nutrientes de la solución, las concentraciones de éstos, tanto como el pH de la solución, cambian. Por esta razón, es esencial un control cuidadoso de todos estos factores para obtener resultados reproducibles. Esta técnica es muy adecuada para las especies que se reproducen por semilla sexual con pequeñas reservas nutritivas y tienen un crecimiento inicial rápido. No es muy adecuada para especies como la yuca, la cual se reproduce vegetativamente a partir de estacas o cortes de tallo enraizado, con una gran variabilidad entre plantas.

En la técnica de la solución nutritiva hay esencialmente dos metodologías, cada una con sus variaciones. La primera metodología es someter semillas uniformemente seleccionadas a un rango de concentraciones de aluminio durante un período relativamente corto (20 a 48 horas). Este 'contacto' con el aluminio es seguido ya sea por un período de recuperación en una solución nutritiva normal o por un proceso de teñido con hematoxilina, para determinar la concentración de aluminio en la cual hay un daño permanente e irreversible del meristema radical que inhiba su crecimiento posterior. La segunda metodología consiste en

cultivar plántulas en concentraciones altas y bajas de aluminio en la solución durante varias semanas, y determinar el crecimiento relativo del tallo o de la raíz como una medida de su tolerancia al aluminio.

Técnica del 'Contacto' con Aluminio

Moore y otros (1976) emplearon la técnica del contacto con aluminio para seleccionar variedades de trigo. Ellos sometieron cada variedad a diferentes concentraciones de Al durante 48 horas, seguidas por un período de recuperación de 72 horas en una solución nutritiva sin Al tóxico. Después de este período se observaron las raíces para determinar la concentración de Al más baja que ocasionaba una inhibición irreversible de la división celular y, por lo tanto, del crecimiento de la punta de la raíz durante el período de recuperación. En este caso, la punta de la raíz estaba deformada, y a menudo hinchada y decolorada. Durante el período de recuperación, la punta de la raíz no reiniciaba el crecimiento sino que se desarrollaban raíces laterales a alguna distancia de la punta. La Figura 2 muestra que las variedades de trigo muy susceptibles al Al tuvieron un daño irreversibles en la punta de la raíz en las concentraciones bajas de Al de 6 a 10 ppm; en las variedades moderadamente sensibles, esto ocurrió aproximadamente a 14 ppm, para las variedades moderadamente tolerantes a 40 ppm, y para las muy tolerantes a 130 ppm. De esta forma, se separan las variedades de trigo en cuatro categorías de sensibilidad al Al claramente distinguibles, representada cada una por una variedad estándar, la cual se incluye en cada prueba.

Polle et al. (1978a y 1978b) desarrollaron una variación de la técnica del 'contacto' con aluminio usando la técnica de teñido con hematoxilina para determinar visualmente el daño ocasionado a las puntas de raíz durante un contacto de 20 horas con varias concentraciones de Al en solución. Para seleccionar las variedades de trigo, ellos utilizan soluciones nutritivas de 5, 10 y 20 ppm de Al, mientras que para maíz recomiendan soluciones de 4.0, 6.7, 9.5, 12.1, 14.8 y 17.5 ppm. Después de la germinación, se seleccionan las semillas uniformes de cada variedad y se colocan tres de ellas en huecos en cada una de seis bandas de espuma de estireno. Después de 24 horas en una solución nutritiva normal, se transfieren las bandas a soluciones de diferentes concentraciones de Al durante 20 horas, seguidas por un lavado en agua destilada y un teñido durante 15 minutos en

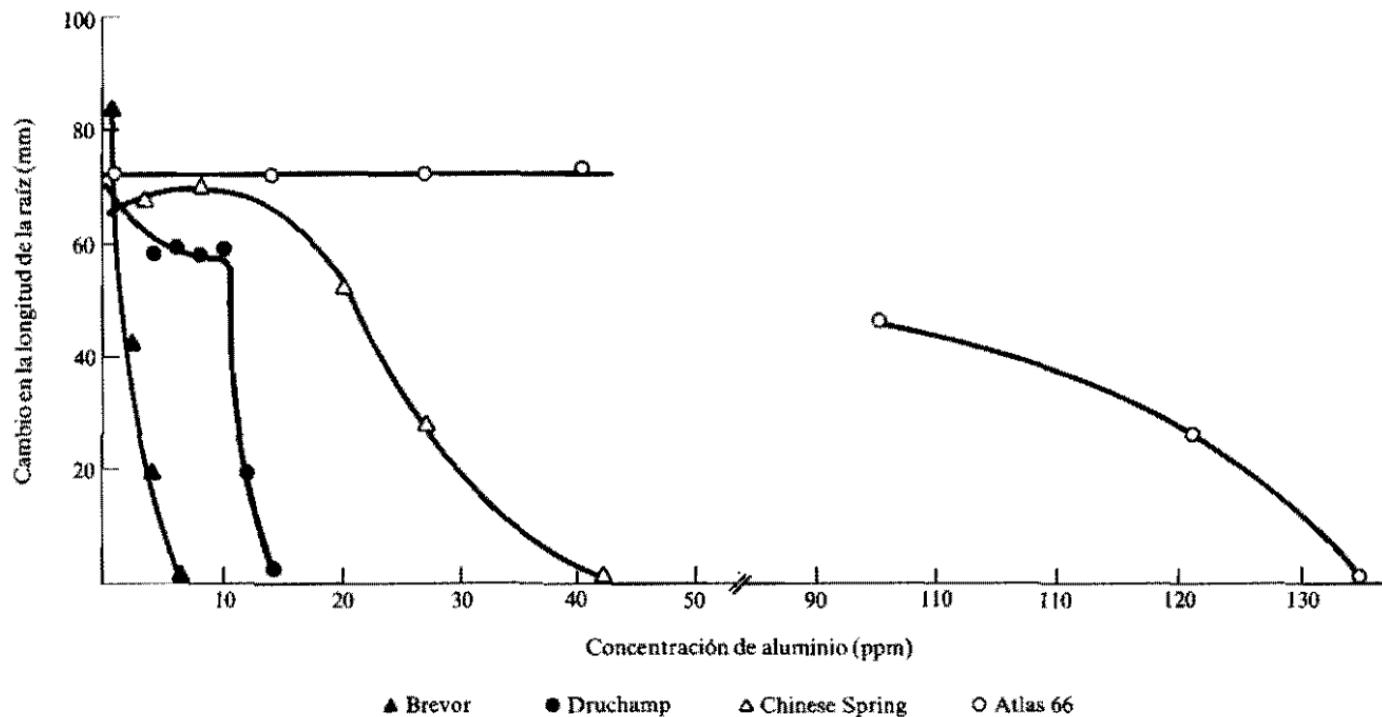


Figura 2. Cambio en la longitud de la raíz primaria en el período de recuperación de 72 horas, después del tratamiento de 48 horas de 'contacto' con Al, en cuatro cultivares estándar de trigo.

FUENTE: Moore et al., 1976.

hematoxilina al 0.2%. Después de lavar el exceso de hematoxilina, se cortan las puntas de la raíz y se colocan en papel filtro siguiendo el orden en que aumenta la concentración de Al. El grado de tolerancia al Al se determina observando la concentración de Al en la cual el área detrás de la punta de la raíz se tiñe con hematoxilina. En la variedad de trigo Brevor, sensible al aluminio, esto ocurrió a 5.4 ppm, mientras que en la variedad Atlas, tolerante, ocurrió a 32.4 ppm. Incluyendo tres o cuatro variedades estándar en cada prueba, se puede calificar con exactitud la tolerancia al aluminio de las líneas de mejoramiento.

Crecimiento Relativo en Dos Concentraciones de Aluminio

La tolerancia al aluminio se puede evaluar también sembrando cada variedad en dos concentraciones de Al, una concentración baja, o cero, en la cual el crecimiento de la planta es óptimo, y una concentración alta en la cual el crecimiento, especialmente de las raíces, es afectado por la toxicidad del Al. Después de varias semanas de crecimiento en estas dos soluciones nutritivas, se determina la tolerancia al aluminio de cada variedad por la longitud o el peso relativos de la raíz en las concentraciones alta y baja del aluminio en solución. Mientras que la mayoría de las especies muestran un crecimiento óptimo en la solución nutritiva sin aluminio, algunas especies crecen aún mejor en soluciones con bajas concentraciones de aluminio. Howeler y Cadavid (1976) y CIAT (1978) recomendaron, para un crecimiento óptimo en arroz y en yuca, concentraciones de 3 ppm de aluminio. La concentración alta se debe seleccionar de tal forma, que las variedades tolerantes al aluminio resulten poco afectadas mientras que las variedades susceptibles deben mostrar una reducción notoria del crecimiento de la raíz. La selección de esta concentración alta de aluminio depende de la tolerancia general al aluminio de la especie vegetal que se debe seleccionar tanto como de las concentraciones de P, Ca, Mg, K, y del pH y la temperatura de la solución nutritiva. Rhue y Grogan (1976) recomendaron un pH de 4.6 para el maíz y una solución nutritiva preparada recientemente, ya que el efecto tóxico del aluminio decrece cuando aumentan la edad o el pH de la solución. A un pH superior a 4.5, especialmente en presencia de altas concentraciones de Al, P, y Ca, el Al precipita en la solución nutritiva y su efecto tóxico disminuye. Ya que el pH

de la solución nutritiva aumenta o disminuye debido a la absorción diferencial de NO_3^- o de NH_4^+ de la solución, es muy importante ajustarlo diariamente, usando soluciones diluidas de HCl y NaOH. Las concentraciones de P y Ca de la solución deben ser lo suficientemente bajas para prevenir la precipitación de Al, pero suficientemente altas para ofrecer a las plantas cantidades adecuadas de estos nutrimentos. Para prevenir el gasto completo de los nutrimentos, se deben renovar completamente las soluciones a intervalos frecuentes, dependiendo de la tasa de crecimiento de la planta y de la tasa de extracción de nutrimentos de la solución.

Después de 2 a 3 semanas de crecimiento continuo en estas dos soluciones nutritivas con aluminio, se cosechan las plantas de cada variedad y se evalúa su tolerancia al aluminio, ya sea determinando el peso total de la planta o de las raíces, o midiendo la longitud máxima de las raíces para cada concentración. A partir de la longitud (o peso) radical relativo se calcula un índice de tolerancia al aluminio para las concentraciones altas y bajas de Al. En cada prueba se incluyen las variedades estándar para hacer ajustes por los cambios pequeños de las condiciones experimentales entre una y otra prueba. Los valores típicos de la longitud relativa de las raíces utilizando una concentración de 43 ppm de Al como concentración alta fueron 0.14 para Brevor, 0.38 para Druchamp, 0.54 para Primavera China, y 0.83 para las variedades Atlas tolerantes al aluminio (Polle et al., 1978a). Si es necesario evaluar grandes cantidades de líneas para mejoramiento, y su longitud (o peso) radicular es casi el mismo sin el estrés del Al, es conveniente a menudo seleccionar solamente en el nivel alto de Al, doblando así el número de materiales que se pueden seleccionar en cada ocasión. En este caso, se compara el crecimiento radicular de cada línea con cierto número de variedades estándar, con lo cual se calcula el índice de tolerancia al aluminio.

Tanto las condiciones experimentales como el método para calcular el índice de tolerancia varían ya sea entre los investigadores o entre los cultivos. Algunos investigadores (Howeler y Cadavid, 1976) emplearon semillas germinadas suspendidas sobre una solución nutritiva de modo que las raíces crecieran directamente en la solución aireada; otros (Polle et al., 1978a; 1978b) permitieron que el sistema radical creciera entre una placa de 'lucita' y un papel filtro parcialmente sumergido en la solución nutritiva. Con el sistema anterior la aireación no es necesaria. Hutton (1980) utilizó un sistema de cultivo en arena,

inundado periódicamente con una solución nutritiva que tenía una concentración de 5 ppm de Al, para seleccionar especies de *Leucaena* y líneas de mejoramiento por su tolerancia al aluminio. Este sistema obvia la necesidad de airear o de un sistema especial de apoyo a la planta, pero es relativamente costoso en términos de las bombas y los controladores de tiempo; requiere además una fuente confiable de energía, que no está siempre disponible en el trópico. El sistema de humedecer periódicamente las raíces con una solución nutritiva no es recomendable, a menos que haya una fuente confiable de energía, ya que se pueden perder todas las plantas cuando la energía se interrumpa aun por períodos muy cortos de tiempo.

Para calcular el índice de tolerancia muchos investigadores usan el peso o longitud relativa de la raíz; por ejemplo, longitud radicular en concentraciones altas versus longitud radicular en concentraciones bajas. Otros utilizan el peso total relativo de la planta, o la longitud de las raíces adventicias. Otra variación consiste en cultivar cada variedad primero durante una semana en una solución nutritiva normal, medir la longitud radicular, después transferirla a una solución nutritiva con una concentración alta de Al, y después de 1 a 2 semanas medir la longitud radicular de nuevo. El aumento en la longitud radicular obtenido en la solución con concentración de Al dividido por la longitud radicular original obtenida sin Al es otro método efectivo para calcular el índice de tolerancia al Al. Este sistema consume menos tiempo y reduce el problema de variabilidad entre plantas ya que las medidas se hacen dos veces en la misma planta.

Técnicas de Selección en el Campo

Las técnicas de selección en el campo son similares a las técnicas de selección en soluciones nutritivas con dos concentraciones de Al en cuanto que las mismas variedades o líneas se cultivan en dos o más niveles de concentración de aluminio en el campo. Generalmente se calcula un índice de tolerancia al aluminio a partir del rendimiento obtenido bajo condiciones de alto y bajo estrés de aluminio. Los diferentes niveles de estrés se obtienen aplicando diferentes cantidades de cal, y a menudo sin aplicación de cal en el lote con alto estrés, y una aplicación fuerte de cal para neutralizar todo el aluminio intercambiable en el lote de bajo estrés. Los niveles de cal que se utilizan se deben determinar en ensayos preliminares en los cuales se determinan curvas de respuesta al encalamiento para variedades estándar que tengan

un amplio rango de tolerancia al Al. Bajo las condiciones de alto estrés, la toxicidad del aluminio debe afectar notoriamente las variedades susceptibles mientras que las variedades tolerantes resultan poco afectadas; en condiciones de ningún estrés, todas las variedades deben crecer bien sin síntomas de estrés de aluminio y sin la inducción de deficiencias nutricionales. Por lo tanto, es necesario tener cuidado para no inducir deficiencias de K, Mg, o de elementos menores al aplicar altos niveles de cal agrícola. Spain et al. (1975) reportaron una respuesta negativa al encalamiento en muchas variedades de yuca debido a la inducción de una deficiencia de zinc (Zn) que privó de significado la determinación de los índices de tolerancia al Al. Una vez que se aplicó suficiente Zn en los lotes de alto y de bajo estrés de Al, las variedades se pudieron separar de acuerdo con su tolerancia al Al.

El índice de tolerancia al aluminio se calcula con frecuencia dividiendo el rendimiento obtenido en condiciones de alto estrés por aquél obtenido en condiciones de bajo estrés. Mientras que este método tiende a separar todas las variedades afectadas por la toxicidad de aluminio, también tiende a incluir en el germoplasma realmente tolerante al aluminio aquellas variedades susceptibles al aluminio que tienen bajo potencial de rendimiento cuando no hay estrés. Por lo tanto, las variedades seleccionadas como poseedoras de un índice de tolerancia al aluminio tienen a menudo bajos rendimientos en condiciones tanto de alto como de bajo estrés. CIAT (1978) ha tratado de corregir esta discrepancia multiplicando el rendimiento relativo obtenido en condiciones de alto y de bajo estrés por el rendimiento relativo obtenido en las condiciones de alto estrés, es decir, el rendimiento de cada variedad sometida a alto estrés dividido por su rendimiento máximo obtenido en condiciones de alto estrés. Esto da un peso adicional al comportamiento de la variedad bajo condiciones de alto estrés (el objetivo real del proceso de selección), mientras que corrige parcialmente las variaciones ocurridas de un año a otro y de un sitio a otro por las condiciones experimentales. En lugar del rendimiento más alto obtenido en las condiciones de alto estrés causado por el Al, sería mejor utilizar el rendimiento promedio de un número de variedades estándar sometidas a alto estrés. Esto da un factor de corrección más constante para las variaciones ocurridas en las condiciones experimentales.

Si el objetivo del proceso de selección es identificar variedades que rindan bien en una localidad específica tanto en condiciones

de alto como de bajo estrés, es decir, que produzcan bien bajo condiciones de alto estrés pero mucho mejor aún cuando se aplique cal para eliminar el estrés, entonces la tercera fórmula para el índice de adaptación al aluminio, presentada en el siguiente esquema, es mucho más adecuada. En este caso, los rendimientos obtenidos bajo condiciones de alto estrés se multiplican por aquéllos obtenidos en condiciones de bajo estrés y se dividen por el producto de los rendimientos promedio de todas las variedades en las condiciones de alto y bajo estrés. De esta forma, las variedades con un índice de adaptación mayor que la unidad tienen un rendimiento por encima del promedio bajo condiciones de alto y bajo estrés.

Fórmulas para calcular el índice de tolerancia a la acidez en variedades o líneas mejoradas de diversos cultivos.

- | |
|---|
| 1) $\frac{\text{Rendimiento sin cal}}{\text{Rendimiento con cal}}$ |
| 2) $\frac{\text{Rendimiento sin cal}}{\text{Rendimiento con cal}} \times \frac{\text{Rendimiento sin cal}}{\text{Rendimiento más alto sin cal}}$ |
| 3) $\frac{\text{Rendimiento sin cal}}{\text{Rendimiento promedio sin cal}} \times \frac{\text{Rendimiento con cal}}{\text{Rendimiento promedio con cal}}$ |

Cuando los rendimientos de cada variedad se grafican colocando el rendimiento en bajo aluminio en el eje Y y el rendimiento en alto aluminio en el eje X, estas variedades caen por encima de la línea $y = \frac{C}{x}$, donde C es el producto de los rendimientos promedio en condiciones de alto y bajo Al (Figura 3). Una vez más, C se usa como un factor de corrección para reducir el efecto de la variabilidad ocurrida de año en año o de sitio en sitio. El rendimiento promedio de un conjunto de variedades estándar sería un factor de corrección mejor ya que el rendimiento promedio de la prueba (C) está afectado no solamente por las condiciones experimentales sino también por la tolerancia general al aluminio y por el potencial de rendimiento del germoplasma que se seleccionará.

Otra alternativa es graficar los rendimientos obtenidos en concentraciones altas y bajas de Al como en la Figura 3, pero dividiendo la gráfica en varios campos, con líneas de valores promedio de X y de Y que la dividan en cuatro campos, o con las líneas del promedio de X y de Y, y las de esos promedios más dos veces su desviación estándar, para dividir la gráfica en

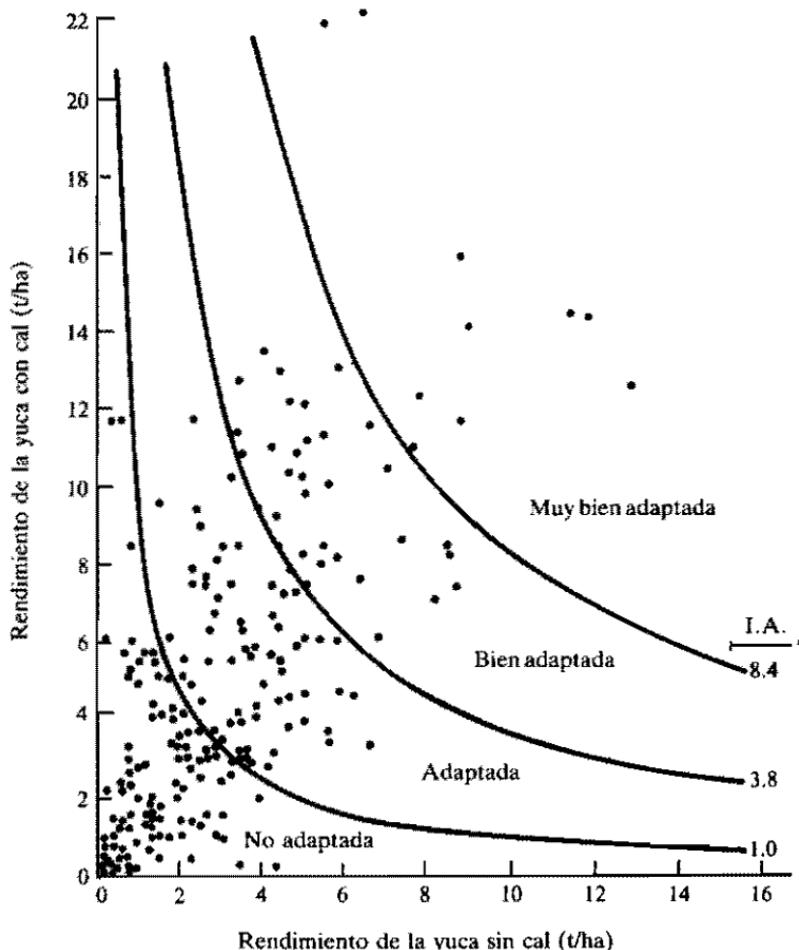


Figura 3. Relación entre los rendimientos de yuca obtenidos con aplicación de cal (4 t/ha) y sin ella, en un campo de selección para 275 variedades y líneas de mejoramiento en Carimagua. Las líneas que dividen las cuatro categorías de adaptación se calcularon con las siguientes fórmulas:

$$Y = 1/X, Y = (C_1/C)/X, \text{ y } Y = (C_2/C)/X,$$

donde $C_1 = (\bar{X} + s) (\bar{Y} + s)$, y $C_2 = (\bar{X} + 2s) (\bar{Y} + 2s)$.

\bar{X} y \bar{Y} son rendimientos promedio sin aplicación de cal y con ella, y s es la desviación estándar; I.A. = Índice de adaptación.

nueve campos (Figura 4). A cada campo se le puede asignar un número o letra, y se pueden agrupar las variedades en cuatro o nueve categorías, según la gráfica. Cada categoría se puede interpretar como una cierta combinación de tolerancia al aluminio y de respuesta al encalamiento. Generalmente, se seleccionan las variedades altamente tolerantes al aluminio pero que al

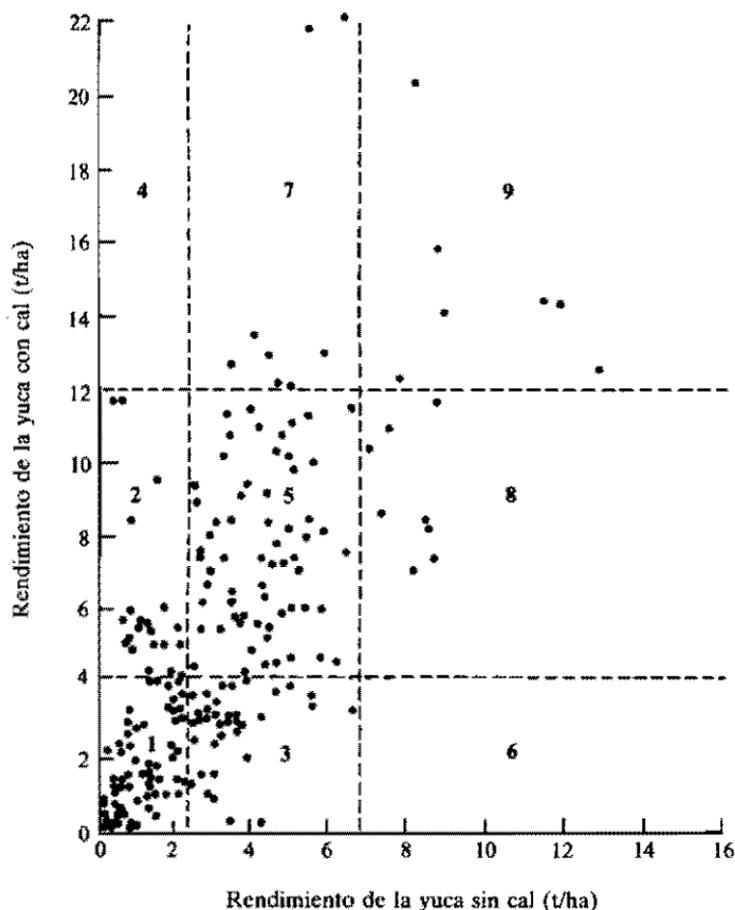


Figura 4. Relación entre los rendimientos de yuca obtenidos con aplicación de cal (4 t/ha) y sin ella, en un campo de selección para 275 variedades y líneas de mejoramiento en Carimagua. Las líneas discontinuas verticales corresponden a \bar{X} y a $\bar{X} + 2s$, y las horizontales a \bar{Y} y a $\bar{Y} + 2s$, donde \bar{X} y \bar{Y} son los rendimientos promedio sin aplicación de cal y con ella, y s es la desviación estándar. Los números señalan nueve campos o categorías de respuesta.

mismo tiempo responden bien a la aplicación de cal, es decir, que rinden bien en concentraciones altas y bajas de cal. Estas serían aproximadamente las mismas variedades seleccionadas como altamente adaptadas en la Figura 3.

Cuando se seleccionan las variedades tanto por su tolerancia al aluminio como al bajo fósforo, se pueden reducir el trabajo y el espacio combinando los lotes de bajo estrés de ambos factores. En este caso, uno puede utilizar tres lotes: el lote de ningún estrés con alta cal y alto fósforo, el lote de estrés de P

con alta cal y bajo P, y el lote de estrés de Al con baja cal y alto P. Los rendimientos obtenidos en condiciones tanto de baja cal como de bajo P se comparan con aquéllos obtenidos en el lote sin estrés, para calcular las tolerancias a Al y a bajo P o los índices de adaptación, respectivamente. Ya que el rendimiento en el lote sin estrés se utiliza para calcular ambos índices, se encuentra a menudo que una misma variedad está adaptada tanto a los niveles de bajo P como a los de alto Al. Debido a que la tolerancia al aluminio puede haber resultado de una mejor habilidad para absorber P, es también fisiológicamente compatible con una tolerancia alta a ambos factores.

La habilidad de ciertas variedades para beneficiarse con una asociación efectiva de las micorrizas vesículo-arbusculares afectará definitivamente su tolerancia a bajas concentraciones de P, ya que reduce sus requerimientos externos de P (Howeler y Sieverding, 1982). Si afecta o no su tolerancia al aluminio, es algo que no se ha determinado todavía. Si lo hace, estaría esa habilidad contra el uso de soluciones nutritivas para seleccionar variedades por su tolerancia al aluminio, ya que raramente se infecta el sistema radical con hongos de micorriza en soluciones nutritivas, mientras que en los suelos sí lo hace. Para cultivos altamente dependientes de las micorrizas, como la yuca y las especies de *Stylosanthes*, la fisiología de absorción del P (y posiblemente del Al) en soluciones nutritivas es muy diferente de la que se desarrolla en suelos infectados con micorrizas. El hecho de que algunos de estos cultivos altamente dependientes de la micorriza sean también muy tolerantes al aluminio puede sugerir una interrelación entre estas dos características. Además, los cultivos altamente dependientes de las micorrizas, como la yuca, tienden a un requerimiento más alto de P en una solución nutritiva sin micorrizas (Howeler et al, 1982); por lo tanto, en soluciones nutritivas con concentraciones altas de aluminio, las cuales deben tener concentraciones bajas de P para evitar la precipitación de fosfatos de Al, estas plantas pueden sufrir de una deficiencia de P.

Comparación de las Técnicas

Las técnicas de selección en el campo tienen una ventaja sobre las soluciones nutritivas: se pueden seleccionar grandes cantidades de líneas al mismo tiempo, bajo las mismas condiciones climáticas y, la mayoría de las veces, a un costo muy reducido. Más aún, el índice de tolerancia al aluminio está basado en

rendimientos reales del producto cosechable y no en el peso o la longitud de la raíz, los cuales no están necesariamente bien correlacionados con el rendimiento. El costo relativo de cada técnica depende del cultivo. El arroz se puede seleccionar fácilmente en soluciones nutritivas porque no requiere aireación, crece en un espacio mínimo y tiene un rango suficiente de tolerancia al aluminio, de tal forma que las variedades se pueden seleccionar fácil y correctamente en esta solución; en el campo, requiere una considerable cantidad de atención y los datos pueden estar afectados por enfermedades o por el ataque de insectos tanto como por el daño de las aves (Howeler y Cadavid, 1976). La yuca, por otra parte, es difícil de seleccionar en solución debido a su propagación vegetativa, su alta dependencia de las micorrizas, grandes requerimientos de aireación y espacio, y gran variabilidad entre las plantas. Este cultivo se puede seleccionar con relativa facilidad en el campo debido a que, una vez sembrado, requiere poca atención por más o menos un año mientras se cosechan las raíces gruesas. En el campo se pueden seleccionar cerca de 700 variedades en un año y se puede reutilizar el mismo campo durante varios años con una cantidad mínima de insumos adicionales.

Sin embargo, las técnicas de selección en el campo tienen dos dificultades principales. Primera, el suelo se debe escoger cuidadosamente para que sea uniformemente alto en Al, bajo en Ca y P y sin exceso de Mn. Además, en algunos suelos con alto contenido de materia orgánica, el efecto tóxico del Al está parcialmente neutralizado por la formación de complejos orgánicos con Al (Munévar y Wollum, 1983). De esta forma, en dos suelos con un contenido similar de aluminio intercambiable y de saturación de aluminio, la yuca mostró muy poca respuesta al enclavamiento en el suelo de alta materia orgánica de Quilichao, y una respuesta notable en el suelo bajo en materia orgánica de Carimagua. Por esa razón, no se puede evaluar la tolerancia al aluminio de estas variedades en Quilichao. En muchos casos es difícil encontrar condiciones uniformes y de estrés suficientemente alto para los cultivos tolerantes al aluminio. De otra parte, para los cultivos susceptibles al Al, como los frijoles y el sorgo, las condiciones de estrés pueden ser muy altas para que sobreviva cualquier variedad y, en ese caso, es necesario aplicar un poco de cal aun en el lote de alto estrés. Mantener los mismos niveles de estrés durante varias estaciones de siembra es casi imposible de alcanzar, y los resultados del proceso de selección de una estación de cultivo no son necesariamente comparables con los de otra.

La segunda dificultad importante es que las plantas, en el campo, están sujetas a las enfermedades y a los insectos, que son a menudo muy difíciles de controlar completamente. De esta forma, las variedades susceptibles al complejo de insectos y enfermedades en una localidad pueden mostrar poca tolerancia al aluminio en esa localidad, pero mucha mejor tolerancia en localidades donde estos insectos y enfermedades no están presentes. Por ejemplo, debido a la presión alta de enfermedades e insectos en Carimagua, solamente un pequeño porcentaje del germoplasma de yuca, de arroz o de frijol se puede seleccionar en esa localidad; las otras variedades son devastadas por enfermedades o insectos, o su comportamiento es afectado seriamente por estos factores adicionales de estrés.

Resumen

Los resultados obtenidos con técnicas de solución nutritiva se deben correlacionar muy bien con aquéllos obtenidos en las selecciones de campo. Hasta el momento, los métodos de selección con soluciones nutritivas desarrollados por casi todos los investigadores no se han correlacionado con los resultados de campo. Campbell y Lafever (1976) encontraron una alta correlación entre los resultados de las selecciones de trigo hechas en una solución nutritiva y los de aquellas selecciones hechas en el campo. La correlación fue ligeramente mejor cuando los valores de la longitud radicular relativa (LRR) se usaron como índice de tolerancia en solución, en vez de un índice de tolerancia basado en los promedios de las variedades estándar. Howeler y Cadavid (1976) encontraron que los rendimientos de 240 cultivares de arroz sembrados en un nivel de 0.5 t/ha de cal estaban bien correlacionados ($r = 0.64$) con los valores LRR de las mismas variedades determinados en soluciones nutritivas de 3 y de 30 ppm de Al. Por tanto, para el arroz y el trigo, los cuales muestran un amplio rango de tolerancia al Al, las técnicas de solución nutritiva son rápidas y muy precisas para la selección de las variedades altamente tolerantes al Al. En especies como la yuca, que tienen una dependencia muy alta de las micorrizas y un rango mucho más pequeño de tolerancia al aluminio, las selecciones de campo basadas en rendimientos reales parecen más confiables y, en muchos casos, más eficientes para seleccionar germoplasma de alto rendimiento con buena tolerancia a una acidez extrema del suelo.

Referencias

- Campbell, L. G. y Lafever, H. N. 1976. Correlation of field and nutrient culture techniques of screening wheat for aluminum tolerance. En: Proceedings of the workshop on plant adaptation to mineral stress in problem soils. Wright, M. J. (ed.). Cornell University, Ithaca, N.Y., E.U. p. 277-286.
- CIAT (Centro Internacional de Agricultura Tropical). 1978. Informe Anual 1977. Cali, Colombia. p. C59-C68.
- Howeler, R. H.; Asher, C. J. y Edwards, D. G. 1982. Establishment of an effective endomycorrhizal association in cassava in flowing solution culture and its effect on phosphorus nutrition. *New Phytol.* 90:229-238.
- y Cadavid, L. F. 1976. Screening of rice cultivars for tolerance to Al-toxicity in nutrient solutions as compared with a field screening method. *Agron. J.* 68:551-555.
- y Sieverding, E. 1982. La importancia de las micorrizas en la absorción de fósforo por la yuca. *Suelos Ecuatoriales* 12(2): 182-195.
- Hutton, E. M. 1980. Breeding *Leucaena* for acid tropical soils. *Leucaena Newsletter* 1:7.
- Moore, D. P.; Kronstad, W. E. y Metzger, R. J. 1976. Screening wheat for aluminum tolerance. En: Proceedings of the workshop on plant adaptation to mineral stress in problem soils. Wright, M. J. (ed.). Cornell University, Ithaca, N.Y., E.U. p. 287-295.
- Munévar, F. y Wollum A. G. 1983. Factores físicos, químicos y biológicos que influyen en la mineralización de la materia orgánica en Andosoles. *Suelos Ecuatoriales* 13(1):57-72.
- Polle, E.; Konzak, C. F. y Kittrick, J. A. 1978a. Rapid screening of wheat for tolerance to aluminum in breeding varieties better adapted to acid soils. *AID Technical Series Bulletin No. 21.* 21 p.
- ; ——— y ———. 1978b. Rapid screening of maize for tolerance to aluminum in breeding varieties for better adaptation to acid soils. *AID Technical Series Bulletin No. 22.* 23 p.
- Rhue, E. D. y Grogan, C. O. 1976. Screening corn for aluminum tolerance. En: Proceedings of the workshop on plant adaptation to mineral stress in problem soils. Wright, M. J. (ed.). Cornell University, Ithaca, N.Y., E.U. p. 297-310.
- Sánchez, P. A. 1981. Suelos del trópico: Características y manejo. Instituto Interamericano de Capacitación para la Agricultura (IICA), San José, Costa Rica. 634 p.

- Spain, J. M.; Francis, C. A.; Howeler, R. H. y Calvo, F. 1975. Differential species and varietal tolerance to soil acidity in tropical crops and pastures. En: Soil management in tropical america. Bornemisza, E. y Alvarado, A. (eds.). North Carolina State University, Raleigh, N.C., E.U. p. 308-329.

Tolerancia a la Toxicidad del Aluminio en Arroz de Secano para Suelos Acidos

César P. Martínez y Surapong Sarkarung*

Introducción

En América Latina se siembran aproximadamente 8.2 millones de hectáreas con arroz, de las cuales 74% corresponden al arroz de secano. La producción total estimada es de 16.3 millones de toneladas de arroz cáscara, de las cuales el 47% proviene del sector secano.

Es incorrecto pensar que el arroz secano en América Latina representa un sistema uniforme, en el cual las prácticas agronómicas, las condiciones climáticas y las limitantes de la producción son similares. Por el contrario, se caracteriza por una sucesión continua de ecosistemas que van desde los niveles más bajos en productividad hasta los más altos. Los suelos utilizados, así como también la pluviosidad y la distribución de las lluvias, son muy variables.

Las sabanas de Colombia, Venezuela y Guyana, la Amazonia, el Cerrado del Brasil, las pampas de Bolivia y otras áreas menores constituyen una de las mayores extensiones de tierras inexploradas del mundo y representan una gran reserva para la producción de alimentos como el arroz. En buena parte de esta región se combinan precipitación abundante y bien distribuida con suelos ácidos de baja fertilidad pero de buenas características físicas. Otros factores climáticos, como la temperatura, la humedad relativa y la radiación solar son favorables para la producción de arroz (CIAT, 1983; Sánchez y Salinas, 1981).

El objetivo de este trabajo es discutir algunos de los efectos producidos por el aluminio en la planta de arroz, y señalar los métodos utilizados por el Programa de Arroz del CIAT en el desarrollo de variedades tolerantes a la toxicidad del aluminio y a la baja fertilidad de los suelos de sabana de América Latina.

* Fitomejoradores, Programa de Arroz, Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), Cali, Colombia.

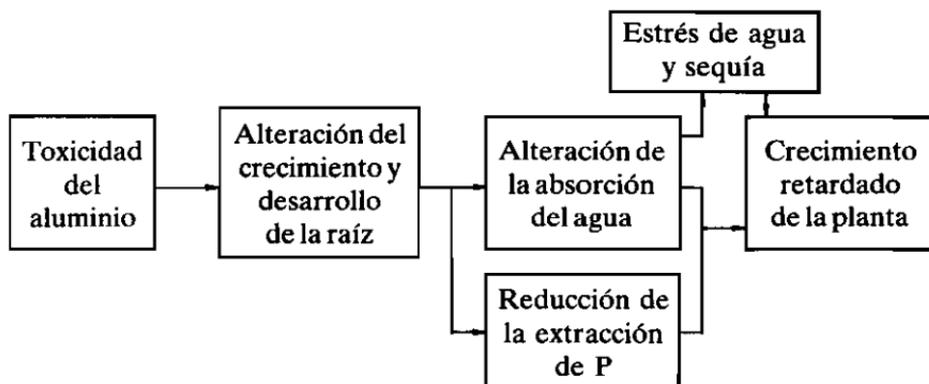
Investigación de la Tolerancia al Al en el Arroz

Diferencias varietales

La toxicidad producida por el aluminio es una limitante importante para la producción de arroz en suelos ácidos. Niveles de aluminio de 2 a 3 meq/100 g de suelo son frecuentes en las sabanas de Colombia, Venezuela, Guyana, y en el Cerrado de Brasil. Suelos que tienen porcentajes de saturación de aluminio mayores de 60% presentan problemas de toxicidad por aluminio (Cochrane y Sánchez, 1982; Sánchez y Salinas, 1981; Camargo, 1982; Howeler y Cadavid, 1976; IRRI, 1978; IRRI, 1980; Martínez, 1976; Sarkarung, 1984).

En varios de estos estudios, realizados tanto en condiciones de campo o utilizando soluciones nutritivas en el invernadero, se han encontrado diferencias varietales en la respuesta del arroz a la toxicidad del aluminio. Variedades como Monolaya, Colombia 1, Bluebonnet 50, IAC 165, IAC 1246, IAC 25, TOX 1010-49-1, TOX 1781-15-1, IRAT 112 y Ngovie fueron calificadas como tolerantes mientras que cultivares tales como IR8, IR665-23-3-1, CICA 4 y Metica 1 fueron considerados como susceptibles a la toxicidad por aluminio.

La toxicidad causada por el aluminio se manifiesta, en las variedades susceptibles, como un amarillamiento severo de las hojas jóvenes y en la muerte de las hojas más viejas; a medida que los síntomas se intensifican, las plantas se atrofian y desarrollan pocas raíces. Se observan a veces efectos indirectos causados por esa toxicidad, como la deficiencia de magnesio y fósforo (Martínez, 1976; Sarkarung, 1984). Según De Datta (1981), el efecto de la toxicidad de aluminio sobre la planta de arroz se puede representar así:



Martínez (1976) estudió el comportamiento de siete variedades de arroz a varias concentraciones de aluminio en soluciones nutritivas (Cuadro 1). Se midió la longitud de la raíz principal inmediatamente después del tratamiento con aluminio, y luego se colocaron las plántulas en una solución nutritiva libre de aluminio durante 48 horas; al final de dicho período se midió de nuevo la raíz, y la diferencia entre esas medidas se presenta en el Cuadro 1. A medida que se incrementó el contenido de aluminio, disminuyó la longitud de la raíz en todas las variedades. Sin embargo, hubo diferencias significativas entre las variedades.

Cuadro 1. Influencia del aluminio sobre la longitud de la raíz de algunos cultivares de arroz.

Cultivares	Longitud (mm) a concentración de aluminio ^a de:			
	0 ppm	20 ppm	25 ppm	30 ppm
Monolaya	26.1 abc	20.4 a	13.7 ab	2.8 a
Bluebonnet 50	25.4 ab	20.0 ab	14.7 a	7.5 a
IR665-23-3-1	21.4 abc	1.3 d	1.4 d	0.4 a
IR8	20.5 abc	3.8 cd	3.3 cd	1.8 a
CICA 4	19.1 c	2.9 cd	1.4 d	0.6 a
IR5-64-2-2	16.9 c	6.3 cd	2.8 cd	2.3 a
Colombia 1	15.4 c	7.9 c	4.4 cd	0.7 a

a. Error estándar = 0.8314. Los promedios seguidos por la misma letra en cada columna no son significativamente diferentes ($P \leq 5\%$) según la prueba del rango múltiple de Duncan.

FUENTE: Martínez, 1976.

Efecto del aluminio sobre la división celular

Se estudió el efecto del aluminio sobre el proceso mitótico en el meristema de la raíz principal (Martínez, 1976). Se tomaron muestras de las puntas de las raíces de plántulas cultivadas en soluciones nutritivas con y sin aluminio; esas muestras se tomaron a intervalos regulares y en cada caso se contó el número de células que estaban en proceso de división (Cuadro 2). Los datos indican menor actividad mitótica en el meristema de la raíz de variedades susceptibles a la toxicidad por aluminio, tales como CICA 4 e IR665-23-3-1 que en las variedades tolerantes como Monolaya y Bluebonnet 50, aun con sólo seis horas de exposición a la solución con aluminio. El número de células en proceso de división celular es muy bajo a las 72 y 96 horas y, en el caso de IR665-23-3-1 y CICA 4, los valores difieren significativamente de los correspondientes a Monolaya y Bluebonnet 50.

Cuadro 2. Efecto del aluminio (20 ppm) en el número de células en proceso de división mitótica, en una muestra de 500 células del meristema de la raíz.¹

Tratamiento	Células (no.) en mitosis en:			
	Monolaya	CICA 4	Bluebonnet 50	IR665
6 horas: - Control	17.5	14.0	17.0	16.0
- 20 ppm Al	13.0	9.5	14.3	6.8 ^{ab}
24 horas: - Control	17.5	20.3	17.3	17.5
- 20 ppm Al	14.3	6.5 ^{ab}	13.3	4.8 ^{ab}
48 horas: - Control	21.3	16.8	16.0	17.0
- 20 ppm Al	11.3 ^a	7.5 ^a	11.8	4.0 ^{bc}
72 horas: - Control	16.8	15.8	17.8	18.0
- 20 ppm Al	10.0	1.5 ^{ac}	10.5 ^a	2.0 ^{bc}
96 horas: - Control	14.8	14.8	17.3	15.0
- 20 ppm Al	11.5	3.0 ^{bc}	10.5	2.3 ^{bc}
> 48 horas: - Control	13.8	14.8	15.3	15.3
- 20 ppm Al	14.5	3.0 ^{bc}	11.8	3.0 ^{bc}

1. Error estándar: 1.034; DMS (0.05) = 7.0.

a = Difiere significativamente del control respectivo.

b = Difiere significativamente de Monolaya o de Bluebonnet 50.

c = Difiere significativamente de Monolaya y de Bluebonnet 50.

FUENTE: Martínez, 1976.

Además, se contó el número de células que se encontraba en cada una de las fases de la mitosis (profase, metafase, anafase y telofase) y se encontró que el aluminio afectó todo el proceso mitótico y no una fase (o varias) en particular (Martínez, 1976).

Herencia de la tolerancia a la toxicidad de aluminio

Martínez (1976) efectuó cruzamientos entre variedades tolerantes y susceptibles a la toxicidad por aluminio y evaluó las generaciones F₁, F₂ y BC₁ en soluciones nutritivas utilizando 20 ppm de aluminio. Se encontró que en las variedades Monolaya y Bluebonnet 50, la tolerancia a la toxicidad por aluminio era recesiva y estaba controlada por dos pares de genes; esos genes, en estas dos variedades, son posiblemente alélicos y presentan diferentes grados de expresión o de penetración incompleta.

Camargo (1982) utilizó una técnica similar y encontró que la tolerancia a la toxicidad por aluminio está bajo control genético en las variedades IAC-165, IAC-47, IAC-25 e IAC-1246; más aún, había una dominancia parcial de la susceptibilidad sobre la tolerancia.

La discrepancia entre los dos estudios anteriores puede deberse a diferencias en los métodos empleados, ya que el tiempo de exposición de los materiales a las soluciones con aluminio no fue igual. No obstante, ambos estudios indicaron que la variación genética varía de acuerdo con la cantidad de aluminio empleada en la evaluación de las poblaciones segregantes. No hubo efecto materno en la expresión de la tolerancia a la toxicidad del aluminio.

Mejoramiento Varietal para Suelos Ácidos de Sabana

Localización y características del ecosistema

Los trabajos de evaluación y selección de materiales tolerantes a los suelos ácidos de sabana se realizan en Villavicencio, Colombia, en el Centro Regional de Investigación La Libertad, estación experimental perteneciente al Instituto Colombiano Agropecuario (ICA). Esta área se caracteriza por una precipitación abundante (3477 mm/año) y bien distribuida (Owen, 1982). Los suelos se conocen como Oxisoles y son ácidos (pH 4.4); el contenido de aluminio es de 3 meq/100 g de suelo, y la saturación de aluminio es de 83%; los contenidos de fósforo, potasio, calcio, magnesio, azufre y boro son muy bajos. La capacidad de retención de agua del suelo es muy baja.

Objetivos y estrategias

La estrategia general está encaminada hacia la obtención de variedades adecuadas a una tecnología de bajos insumos. Estas variedades deben ser tolerantes a varios problemas del suelo, especialmente a la toxicidad del aluminio; deben ser tolerantes también a las principales enfermedades y plagas (piricularia, escaldado de la hoja, hoja blanca, manchado del grano, helmintosporiosis, *Sogatodes* y barrenadores del tallo) presentes en este ecosistema; deben poseer buena calidad de grano y utilizar eficientemente los escasos nutrientes disponibles en el suelo.

El programa de mejoramiento abarca inicialmente dos aspectos principales:

- la introducción y evaluación del germoplasma por su tolerancia a la toxicidad causada por el aluminio; y

- un programa de hibridación y selección para incorporar, en el material tolerante al aluminio, otros caracteres deseables como resistencia a plagas y enfermedades, buena calidad del grano y buen rendimiento.

Los criterios de selección seguidos en el desarrollo de un tipo de planta ideal para esta ecología de sabana son:

- raíces largas, gruesas y profundas;
- buen vigor inicial;
- plantas de estatura baja o intermedia (90 a 120 cm);
- hojas superiores erectas de senescencia lenta;
- granos largos, delgados y pesados;
- macollamiento intermedio y tallos fuertes; y
- bajo porcentaje de esterilidad.

Materiales y métodos

En 1984 se evaluaron alrededor de 1360 cultivares que incluían líneas mejoradas, variedades nativas, y materiales tradicionales procedentes de diferentes instituciones como IITA, IRAT, IRRI, CIAT y del Instituto Agronômico de Campinas (CIAT, 1985; Sarkarung, 1984). Se usó un diseño de campo consistente en 'franjas ácidas' formadas por dos bandas, una de alta y otra de baja acidez. Esta última se obtuvo aplicando 3 t/ha de cal dolomítica 15 días antes de la siembra, con el fin de aumentar el pH del suelo y neutralizar el aluminio; la banda de alta acidez no recibió cal.

Los materiales en evaluación se sembraron en bloques que abarcaban tanto las bandas de alta como las de baja acidez. La variedad Metica 1 (susceptible) y las variedades IRAT 122 e IAC 165 (tolerantes) se sembraron como testigos después de cada hilera de 12 cultivares. Todas las parcelas recibieron una fertilización mínima al momento de la siembra, a saber: 50 kg/ha de N (urea), 60 kg/ha de P_2O_5 (superfosfato triple) y 40 kg/ha de K_2O (muriato de potasio). Para evitar efectos confusos por posibles daños de enfermedades e insectos, se aplicaron insecticidas y fungicidas regularmente. La toxicidad del aluminio se evaluó a los 40 y a los 70 días después de la siembra, empleando escalas de lectura de 1 a 5 (Cuadro 3).

Cuadro 3. Escala para evaluar los síntomas de la toxicidad causada por el aluminio.

Escala	Síntomas
1	Ninguna diferencia en el desarrollo con alta o baja acidez.
2	Ligero amarillamiento de algunas plantas en condiciones de acidez alta; el desarrollo de la planta se modifica muy poco.
3	Cierto amarillamiento en las plantas; ligera disminución de su altura.
4	Amarillamiento uniforme y notoria disminución en la altura; no hay hojas muertas.
5	Amarillamiento severo, fuerte disminución en la altura, y muerte de las hojas inferiores.

FUENTE: Sarkarung, 1984.

Resultados y discusión

Los cultivares más susceptibles a la toxicidad del aluminio presentaron un amarillamiento muy intenso y el crecimiento de la planta y de las raíces se afectó bastante. Los cultivares tolerantes (Cuadro 4) crecieron bien en ambas condiciones (alta y baja acidez) y fueron clasificados en las categorías 1 y 2 de la escala (Cuadro 3). En total, de los 1360 cultivares evaluados sólo 180 mostraron buena adaptación a las condiciones de sabana y serán usados como progenitores en el programa de cruzamiento (CIAT, 1985; Sarkarung, 1984). La tolerancia al aluminio se encontró en cultivares de distinto origen geográfico. Líneas mejoradas recibidas de los programas de mejoramiento del IITA, del IRAT y del IAC-Campinas mostraron una buena adaptación, y parecen poseer un nivel mayor de tolerancia al aluminio que las variedades locales, Monolaya y Colombia 1.

Se observó, en general, que todos los cultivares tolerantes al aluminio tenían raíces profundas, pero no todos los genotipos de raíces profundas eran tolerantes a la toxicidad por aluminio.

Entre los materiales evaluados había algunos genotipos enanos altamente rendidores. Se observó que estos genotipos se adaptaban muy mal a este ecosistema. Estos genotipos de riego se caracterizan por tener un sistema de raíces superficial y excesivo macollamiento y, tal vez por ello, están más predispuestos al 'estrés de secano', a los desequilibrios nutricionales, y a la deficiencia de agua en el suelo.

No hubo correlación entre la altura de la planta y la tolerancia a la toxicidad causada por el aluminio (Cuadro 5). Muchos genotipos enanos de secano presentaron una alta tolerancia al

Cuadro 4. Cultivares que presentaron alta tolerancia a la toxicidad causada por el aluminio, y su origen. Centro Regional de Investigación La Libertad, ICA, Meta, Colombia, 1984.

Cultivar	Origen
A. Líneas avanzadas de mejoramiento:	
TOX 891-212-2-102	IITA, Nigeria
TOX 1010-22-7-16	IITA, Nigeria
TOX 1010-49-1	IITA, Nigeria
TOX 1815-34-201-201-1	IITA, Nigeria
TOX 1781-15-1	IITA, Nigeria
TOX 1780-5-7	IITA, Nigeria
IRAT 194-1-2-B	IRAT, Costa de Marfil
IRAT 112	IRAT, Costa de Marfil
IRAT 122	IRAT, Costa de Marfil
IRAT 146	IRAT, Costa de Marfil
IAC 164	IAC-Campinas, Brasil
IAC 5032	IAC-Campinas, Brasil
IAC 25/PJ-110-99-1-4-1	INIA, México
OS6/IRAT 13-A1-1CM-1JM	INIA, México
B. Variedades tradicionales y nativas:	
Ngovie	Sierra Leona, Africa
Lac 23	Liberia, Africa
Ku 28	Tailandia, Asia
Padi Bokokut	Indonesia, Asia
OS6	Zaire, Africa
Zebu	Filipinas, Asia
Monolaya	Colombia, América del Sur
TOS 5806	Africa
63-83	Costa de Marfil, Africa

Cuadro 5. Relación entre la altura de la planta y la toxicidad al aluminio de algunas variedades evaluadas en franjas ácidas, en un experimento hecho en el Centro Regional de Investigación La Libertad, ICA, Meta, Colombia, 1984.

Cultivar	Altura de la planta (cm)	Reacción al aluminio ^a	Ecosistema
TOX 891-212-2-102	55	1	Secano
TOX 1815-34-201-201-1	75	1	Secano
TOX 1010-24-6-1-1-1B	61	2	Secano
IRAT 146	55	2	Secano
IRAT 122	77	2	Secano
IRAT 194-1-2-3	66	2	Secano
IAC 25/PJ-110-99-1-4-1	63	1	Secano
Colombia 1/M312A	67	1	Secano
CICA 8	52	5	Riego
IAC 165 (testigo resistente)	96	2	Secano
Metica 1 (testigo susceptible)	55	4	Riego

a. Según la escala del Cuadro 3.

aluminio y buena adaptación a las condiciones de sabana; estas líneas enanas de secano tienen raíces gruesas y profundas (CIAT, 1985).

Se estimó la pérdida en rendimiento debida a la toxicidad por aluminio (Cuadro 6). Los rendimientos relativos de los cultivares tolerantes, moderadamente tolerantes y susceptibles fueron 92%, 70% y 48%, respectivamente, en relación con el rendimiento obtenido en las franjas de baja acidez.

Se estudió también un grupo de cultivares de arroz previamente clasificados como tolerantes en una solución nutritiva que contenía aluminio. Menos del 10% de los 258 cultivares estudiados se calificó en el campo como tolerante. La mayor parte manifestó un amarillamiento severo en las franjas de alta acidez 40 días después de la siembra, aunque algunos se recuperaron en la madurez. Este tipo de tolerancia no es deseable porque trae consigo una reducción del rendimiento.

Cuadro 6. Rendimiento relativo^a de algunas variedades de arroz que manifiestan diferentes reacciones a la toxicidad del Al.

Clase de reacción ^b	Escala ^c	Rendimiento relativo (%)
Tolerante	1-2	92
Moderadamente tolerante	3	70
Susceptible	4-5	48

a. Rendimiento relativo = $\frac{\text{Rendimiento en bandas de alta acidez}}{\text{Rendimiento en bandas encaladas}}$

b. Se tomó una muestra de 50 cultivares por clase.

c. Basada en la escala del Cuadro 3 que se usó para evaluar síntomas de toxicidad por aluminio.

Resumen

El Programa de Arroz del CIAT ha intensificado el mejoramiento de la tolerancia a los suelos ácidos de sabana. Las principales limitantes del arroz en este ecosistema son: falta de variedades de arroz adaptadas a los suelos ácidos e infértiles, limitaciones biológicas (enfermedades e insectos), e información inadecuada sobre algunas prácticas agronómicas. El mejoramiento varietal se ha orientado hacia el desarrollo de variedades de arroz aptas para producir en un sistema de mínimos insumos. Se describe un procedimiento para la selección de variedades en el campo. Se identificaron finalmente cultivares donantes que tenían alta tolerancia a la toxicidad causada por el aluminio.

Referencias

- Camargo, C. E. O. 1982. Evidência de controle genético na tolerância ao alumínio em arroz. (Mimeografiado.)
- CIAT (Centro Internacional de Agricultura Tropical). 1985. Informe anual del Programa de Arroz. Documento interno. Cali, Colombia.
- CIAT (Centro Internacional de Agricultura Tropical). 1983. Oxisoles y Ultisoles en América Central; I: Distribución, importancia y propiedades físicas. Guía de estudio. (Serie 04SP-02.03). Cali, Colombia. 56 p.
- Cochrane, T. T. y Sánchez, P. 1982. Recursos de tierras, suelos y su manejo en la región Amazónica: Informe acerca del estado de conocimientos. En: Hecht, S. B. (ed.). Amazonia: Investigación sobre agricultura y uso de tierras. Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), Cali, Colombia. 448 p.
- De Datta, S. K. 1981. Principles and practices of rice production. Wiley & Sons, Nueva York. 618 p.
- Howeler, R. H. y Cadavid, L. F. 1976. Screening of rice cultivars for tolerance to Al-toxicity in nutrient solutions as compared with a field screening method. Agron. J. 68:551-555.
- IRRI (International Rice Research Institute). 1980. Annual Report for 1979. Los Baños, Filipinas. 548 p.
- . 1978. Annual Report for 1977. Los Baños, Filipinas. 538 p.
- Martínez, C. P. 1976. Aluminum toxicity studies in rice (*Oryza sativa* L.). Tesis (Ph.D.). Oregon State University, Corvallis, Oregon, E.U. 113 p.
- Owen, E. 1982. Principales limitaciones para el cultivo de arroz de secano en suelos de clase IV en los Llanos Orientales. Arroz 31 (320):24-31.
- Sánchez, P. A. y Salinas, J. G. 1981. Low-input technology for managing Oxisols and Ultisols in tropical America. Adv. Agron. 34:279-406.
- Sarkarung, S. 1984. Mejoramiento de materiales de arroz para los suelos de sabana. Arroz en las Américas (Cali, Colombia) 5(2):7-8.

Metodología de Selección por Eficiencia en el Uso del Fósforo y por Tolerancia a la Toxicidad del Aluminio y del Manganeso en el Frijol (*Phaseolus vulgaris* L.)

M. Thung, J. Ortega y O. Erazo*

Introducción

Los rendimientos de frijol en América Latina son en general muy bajos; Brasil (FAO, 1976) y México (Lépiz, 1977), principales productores con más del 70% del área sembrada, tienen rendimientos de menos de 700 kg/ha. Estos bajos rendimientos se deben, entre otras causas, a los suelos con condiciones adversas de acidez, al bajo contenido de P, y a los problemas causados por la alta concentración de Al y la toxicidad del Mn.

La deficiencia del P es el problema nutricional más común del frijol en América Latina. La toxicidad del Al solo, o del Al y el Mn, casi siempre ocurren al mismo tiempo en los suelos ácidos con poca saturación de bases. Müller et al. (1968) mostraron que el 20% de 110 muestras de suelos provenientes de América Central tenían el pH menor que 6.0, y el frijol, es bien sabido, crece mejor en suelos con pH entre 6.0 y 7.15 (Jacob y Vexkuell, 1963).

Desafortunadamente, los suelos de la mayoría de las áreas productoras de frijol en América Latina tienen también un pH inferior a 6.0 (Müller et al., 1968) y en ellos la deficiencia de P es común. Pequeñas aplicaciones de CaCO_3 para mejorar las condiciones del suelo mantienen el Al intercambiable por debajo de los niveles tóxicos, sin aumentar el pH del suelo. El frijol

* Respectivamente: Agrónomo, Programa de Frijol, CIAT (destacado en CNPAF, Goiânia, Goiás, Brasil); asociado de investigación, Programa de Frijol, CIAT; y asistente de investigación, Programa de Frijol, CIAT.

es muy sensible a la toxicidad por exceso de Al y de Mn, y necesita niveles más altos de Ca que otros cultivos, incluyendo en éstos algunas especies de las Poáceas. Para seleccionar el frijol por su eficiencia a bajos niveles de P, se debe controlar, con encalamiento limitado, el problema del complejo del Al y el Mn sin inducir una deficiencia de Zn o de B.

La adición de fertilizantes fosforados está fuera del alcance del agricultor común y, además, la eficiencia de aquéllos es baja. Se estima que la planta de frijol utiliza entre el 10% y el 30% del fertilizante aplicado (Kick y Minhas, 1972). En 1967, Cobra Neto calculó que la planta absorbía 9.1 kg/ha de P y que extraía solamente 3.6 kg/ha de P por cada 1000 kg de semilla producida. Por regla general, cuanto mayor deficiencia de P tenga el suelo, menos eficiente es la planta (en este tipo de suelo) para absorber el P añadido como fertilizante. Por las razones aducidas, es mejor buscar una planta eficiente en el uso de P y moderadamente tolerante a la toxicidad elevada del Al—condiciones normales en los suelos ácidos—que tratar de mejorar el suelo para el cultivo.

Los objetivos de este trabajo son:

1. Evaluar la eficiencia del frijol en el uso de bajos niveles del fósforo del suelo, y su respuesta a la aplicación adicional de P.
2. Evaluar la tolerancia del frijol a la toxicidad del aluminio y del manganeso y su respuesta al encalamiento adicional.
3. Identificar buenos materiales resultantes de la evaluación hecha en 1 y 2.
4. Recomendar a los fitomejoradores los materiales sobresalientes identificados en 3, como eficientes y como fuentes de tolerancia a esos factores, para mejorar luego su arquitectura, y su resistencia a la sequía, a las enfermedades y a las plagas.

El Fósforo en el Suelo y su Deficiencia en la Planta de Frijol

El fósforo está siempre sujeto a cambios constantes en el suelo, y puede encontrarse en tres formas:

1. Disponible para las plantas directamente en la solución del suelo.

2. Inestable pero con posibilidades de ser transformado en una forma disponible para la planta.
3. Completamente fijo y no aprovechable por la planta.

En general, la disponibilidad del P disminuye con la acidez del suelo. La deficiencia del P en la planta de frijol se manifiesta con cambios en el color de las hojas, bordes necróticos, defoliación temprana, crecimiento reducido con tallos muy delgados, y entrenudos cortos. La época de floración se atrasa y el período que va hasta la maduración fisiológica es más corto. La raíz principal es muy corta, y a veces las puntas de raíz son sustituidas por raíces adventicias.

El Aluminio en el Suelo y su Toxicidad en la Planta de Frijol

Entre los elementos mayores presentes en el suelo, el Al ocupa el segundo lugar (Scheffer y Schachtschabl, 1970), pero esta gran cantidad no es dañina cuando no es asimilada por las plantas que son susceptibles a él.

La toxicidad del Al afecta principalmente las raíces, inhibiendo la división celular, reduciendo el desarrollo del sistema radical (Macleod y Jackson, 1967; Fleming y Foy, 1968; Foy, 1974), y el de la planta en general como efecto secundario. La planta susceptible absorbe más el Al y lo acumula dentro de sus raíces o en tejidos externos de ellas. El Al reduce también la absorción de P debido a que éste reacciona con aquél y forma fosfatos de aluminio. La toxicidad del Al en la planta de frijol es fácilmente observable porque la planta es pequeña y está muy suelta en el suelo. Las hojas jóvenes se vuelven amarillas y, si la toxicidad es muy grave, aparecen manchas necróticas visibles en los márgenes. Las raíces son la parte más afectada por el Al, y por esta razón se emplean como parámetro para medir la tolerancia a ese elemento (Armiger et al., 1968; Reid et al., 1971).

El Manganeso en el Suelo y su Toxicidad en el Frijol

El Mn se encuentra en el suelo en tres formas: Mn^{++} , Mn^{+++} , y Mn^{++++} ; solamente el Mn^{++} es fácilmente asimilable por las

plantas, y puede estar en el complejo de absorción o libre en la solución del suelo. Los suelos muy orgánicos y ácidos, como los Andosoles, tienen un alto contenido de este elemento que puede causar mucho daño al frijol.

La absorción de Mn y su transporte dentro de la planta se realiza por medio de la forma iónica Mn^{++} . Esta forma es poco móvil y no puede pasar al floema (Van Goor y Wiersna, 1974); por eso se acumula en las hojas de la planta sin producir síntomas de toxicidad o afectar el rendimiento. Es común encontrar en las hojas un contenido de Mn de 1000 ppm.

Cuando se sobrepasa el nivel de tolerancia, la toxicidad del Mn se manifiesta por el amarillamiento entre las nervaduras, la deformación y 'encocamiento' (enrollamiento formando copa) de hojas y cogollos, y la necrosis de las hojas viejas (cuando la toxicidad es muy grave).

Variación Genética del Frijol en Condiciones Adversas

Hay una clara evidencia de la variación genética del frijol en cuanto a su eficiencia en el uso del P y a su tolerancia a la toxicidad del Al y del Mn. Algunas variedades comerciales de Brasil, como Carioca y Mulatinho 349 (G5059), no solamente son eficientes en el uso del P sino también tolerantes a un nivel moderadamente alto de Al y Mn. Las variedades comerciales de América Central y de Colombia son susceptibles a estas condiciones adversas del suelo. Datos recientes demuestran que el color del grano no afecta la eficiencia de uso del P o la tolerancia al Al o al Mn.

Metodología de Selección

Muchos investigadores han buscado una metodología que facilite manejar grandes cantidades de líneas en un tiempo relativamente corto, en forma económica, y con una buena correlación con el rendimiento final. En el caso de tolerancia de la planta a niveles altos del Al del suelo, la mayoría de los investigadores están de acuerdo en que las raíces, la parte de la planta más afectada por la toxicidad de Al, son un buen indicador del índice de tolerancia. Foy (1974) usó el índice de crecimiento de las

raíces; Reid et al. (1978) usaron la intensidad del color de las raíces; Hanson et al. (1979) la actividad de la enzima ATP en las raíces. Todos obtuvieron una buena correlación con el rendimiento.

Tanto para el estudio de los efectos del Al como del P se usan partes de la planta que se dañan durante el proceso de evaluación; por tanto, es imposible usar la misma planta para producir semilla, excepto en el método de Polle et al. (1978), quienes sostienen que la planta se puede recuperar después de los tratamientos con hematoxilina. La destrucción de las plantas dificulta la selección en generaciones tempranas y no permite garantizar la identidad genética del material seleccionado, salvo en el caso de plantas genéticamente iguales.

Otro factor que se debe tener en cuenta es que, si la selección ocurre en la época vegetativa, se supone que la planta tiene la misma capacidad de absorción de P en el resto del ciclo de crecimiento ignorando la alta actividad de movilización del P durante la época de formación de las vainas. Haag et al. (1976) mostraron que la absorción máxima de P culminaba en la época de formación de las vainas y se mantenía en ese nivel hasta la maduración fisiológica; la absorción de P, en cambio, era muy baja en el período comprendido entre la germinación y la floración.

Para facilitar la selección de los materiales de acuerdo con su eficiencia o tolerancia se usó como parámetro de evaluación el rendimiento de grano. También se observó que el vigor de crecimiento del cultivo, en cualquier etapa, no tenía correlación clara con el rendimiento final. Las plantas pueden crecer perfectamente bien con bajos niveles de P hasta el período de formación de vainas. En ese momento, las vainas en las parcelas sin estrés de P se llenan normalmente, lo que no sucede con las vainas en las parcelas bajo condiciones de estrés de P.

Técnicas en el Campo

Sitio

La fertilidad varía entre zonas, lo mismo que el nivel de toxicidad de Al o de Mn. Esto implica la necesidad de hacer ensayos preliminares de campo para determinar los niveles de estrés por Al, Mn y P.

Determinación del nivel de estrés por Al y por Mn

Para determinar dicho nivel, se hace un ensayo de encalamiento con diferentes niveles de cal agrícola o dolomítica, y se siembran varios materiales de frijol, incluyendo tipos tolerantes y susceptibles. La toxicidad por Al se calcula de acuerdo con la saturación del mismo en el suelo, según la fórmula de Pearson (1974):

$$\text{Saturación de Al (\%)} = \frac{\text{Al}}{\text{Al} + \text{Ca} + \text{Mg} + \text{K}} \times 100$$

donde las cantidades de cationes se dan como miliequivalentes por 100 g de suelo.

En la Figura 1 se presentan los resultados de un ensayo de este tipo realizado en CIAT-Quilichao (1979A). En este caso, la aplicación de 800 kg de CaCO_3 equivalente, para alcanzar un 65% de saturación de Al, es suficiente bajo las condiciones de esa subestación. Con una dosis menor, el porcentaje de saturación de Al fluctúa erráticamente. Este nivel de saturación de Al parece bastante alto, pero la presencia de un alto contenido de materia orgánica (7%) ayuda a amortiguar la toxicidad del Al con su complejo de absorción. Si se aplica una dosis superior de cal, tanto las plantas susceptibles como las tolerantes crecen y dan buenos rendimientos.

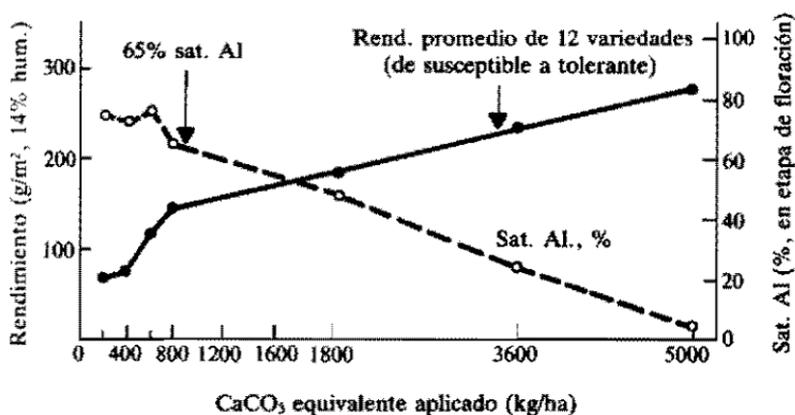


Figura 1. Efecto de la saturación de Al durante la etapa de floración en el rendimiento de 12 variedades de frijol, en CIAT-Quilichao, 1979A; CV = 22% y DE = 40, para $P \leq 0.05$; hum. = contenido de humedad.

En el mismo ensayo se puede determinar también la dosis de CaCO_3 que disminuirá el estrés por Al. Según la Figura 1, una dosis de más de 4000 kg de CaCO_3 equivalente es suficiente para reducir (sin eliminar) el efecto de la toxicidad por Al. La aplicación de más de 6000 kg de CaCO_3 equivalente ocasiona otros problemas como la movilización o fijación de microelementos, la fijación del P, y el estímulo de algunas enfermedades de la planta.

Determinación del nivel de estrés por fósforo

Para conocer el estrés por fósforo se hacen ensayos con el mismo sistema con que se determina el estrés por Al, empleando también diferentes variedades de frijol.

Se deben analizar cuidadosamente los niveles de aplicación de P. En las condiciones de CIAT-Quilichao, el frijol puede crecer perfectamente con un nivel de P cercano a 4 ppm, extraído por Bray II, y con una aplicación de 2000 kg de CaCO_3 equivalente, mientras que en otros lugares esta concentración es insuficiente.

Para determinar el nivel de estrés por P, se hace una gráfica como en la Figura 2, donde los puntos representan un dato de cada variedad y la dispersión de los puntos es máxima, es decir, que la diferenciación de las variedades es lo más notorio. Esta tasa es usada como nivel de estrés por fósforo. En un análisis estadístico, la mayor desviación determina el nivel de estrés por P.

El nivel sin estrés se determina observando los puntos que estén más cerca entre sí. La diferencia que exista entre ellos se toma como la del nivel de rendimiento máximo de las variedades. El nivel sin estrés de P tiene un límite: si se hacen aplicaciones en exceso, se puede alterar la relación entre los elementos y, además, resultan costosas.

Tratamiento de selección simultánea

Después de conocer los dos niveles (con estrés y sin estrés) se pueden combinar para hacer un proceso de selección simultáneo. Cada parcela representa un tratamiento llevado a cabo, con tres repeticiones, por lo menos.

Tratamiento I – Parcelas con estrés por Al pero sin estrés por P

Tratamiento II – Parcelas con estrés por P pero sin estrés por Al

Tratamiento III – Parcelas óptimas (sin estrés por Al o P)

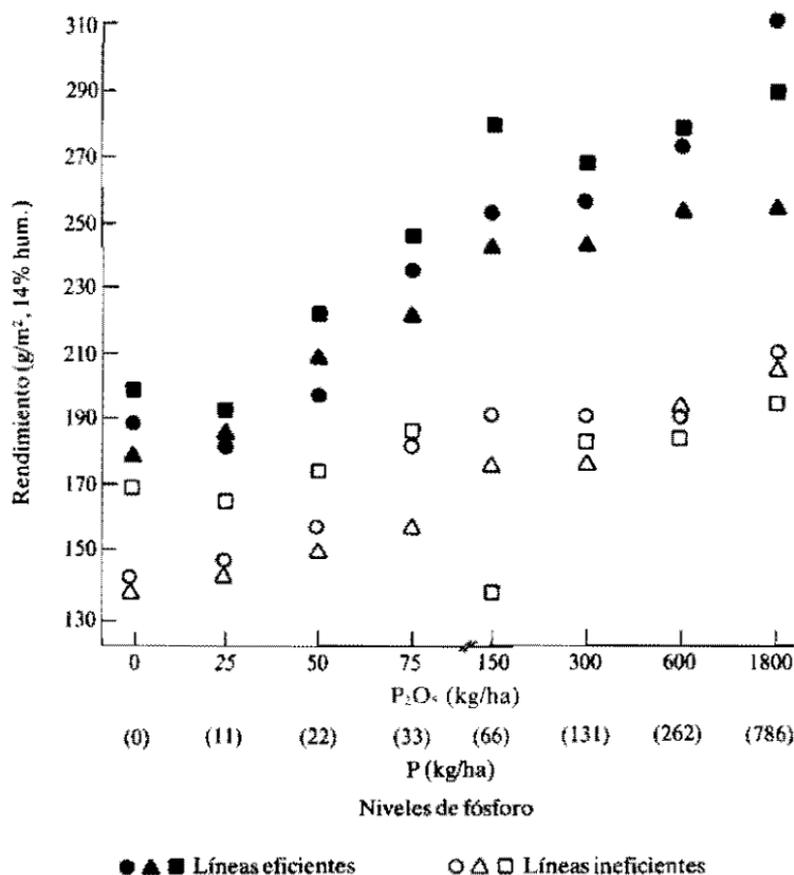


Figura 2. Efecto del fósforo en la producción de frijol en CIAT-Quilichao, en 1979.

Preparación del suelo en parcelas de mejoramiento y selección a gran escala

Después de conocer los niveles con estrés y sin estrés, se prepara el campo para el enclavamiento. La mitad del CaCO_3 se aplica a voleo y se incorpora tan profundamente como sea posible (unos 20 cm); la otra mitad se aplica a voleo antes de la siembra. Se siembra en exceso (20% más) en hileras de tres metros, con una distancia de 60 cm entre hileras, para obtener en el raleo, dos semanas después de la germinación, una población de 25 plantas/m². Los materiales se deben separar según el hábito de crecimiento. Las líneas de hábito de crecimiento I y II (tipos arbustivos) se pueden sembrar separadas, mientras que las de

hábito de crecimiento III (postrado) se deben sembrar juntas para lograr un cierto grado de competencia entre las líneas y no entre los hábitos de crecimiento. Sólo se cosechan secciones de 2 m al interior de las hileras, desechando medio metro en cada extremo de ellas.

Modificaciones a la metodología de selección

Partiendo de los resultados obtenidos en el campo, se hicieron algunas modificaciones y se separó la metodología en tres etapas, que incluyen los aspectos siguientes:

Etapla I. Está integrada por las líneas de frijol (entre 200 y 300) que proceden de los EP (Ensayos Uniformes de Rendimiento, Preliminares) además de siete testigos identificados como tolerantes a las condiciones de los suelos ácidos. Al mismo tiempo se pueden evaluar las líneas avanzadas de los mejoradores o las de los viveros de adaptación (o ambas). Cada material se siembra en parcelas de cuatro surcos agrupados por hábito de crecimiento y por color del grano. Los tratamientos que comprende esta etapa son el estrés de P y el de Al. Para el tratamiento de estrés por P se aplica 1 t/ha de CaCO_3 equivalente por semestre, a voleo e incorporado; 75 kg/ha de P_2O_5 como superfosfato triple (SFT) de 46%, 60 kg/ha de N como urea de 46%, y 60 kg/ha de K_2O como KCl al 60%, en bandas; y los micronutrientes B y Zn al 0.5% aplicados foliarmente, si se manifiestan síntomas de deficiencia.

En el tratamiento de estrés por Al, se aplican 500 kg/ha de CaCO_3 equivalente, 220 kg/ha de P_2O_5 como SFT al 46%, 60 kg/ha de N como urea al 46%, 60 kg/ha de K_2O como KCl al 60%, y micronutrientes, aplicados todos en igual forma que para el tratamiento de estrés por P. No se hacen repeticiones; se toman los datos de adaptación usando una escala de 1 (bueno) a 5 (malo), y se cosechan los surcos centrales para evaluar el rendimiento y sus componentes al 14% de humedad. El lote se protege contra plagas o enfermedades, y se hace un análisis completo de suelos a 0-20 cm y 20-40 cm de profundidad antes de la siembra y después de la cosecha.

Etapla II. En esta se incluyen aquellos materiales (50-80) que muestran buen rendimiento y adaptación en la Etapa I, y los mismos testigos de esta etapa. Se hacen tres tratamientos: uno sin estrés, otro con estrés por P, y otro con estrés por Al, distribuidos en un diseño de bloques al azar con tres repeticiones.

Cada línea se sembró en cuatro surcos de 3 m de largo, con 60 cm de distancia entre surcos. Se toman los datos fenológicos de los dos surcos centrales (días hasta la germinación, días a la floración, días a la madurez fisiológica) y los componentes del rendimiento (número de plantas por parcela, número de vainas en cinco plantas, número de granos en cinco plantas, peso total en g/parcela al 14% de humedad), y se les hace el correspondiente análisis de varianza.

En el tratamiento sin estrés se aplican 2500 kg/ha de CaCO_3 equivalente por semestre, 300 kg/ha de P_2O_5 como SFT al 46%, 100 kg/ha de N como urea al 46%, 100 kg/ha de K_2O como KCl al 60%, 20 kg/ha de S, 1 kg/ha de Mg (20 kg/ha de MgSO_4), 1 kg/ha de B (10 kg/ha de bórax), 5 kg/ha de Zn (25 kg/ha de ZnSO_4), y 1 kg/ha de Mo (1 kg/ha de molibdato de sodio o de amonio).

En el tratamiento de estrés por P se aplican 1000 kg/ha de CaCO_3 equivalente por semestre, y 50 kg/ha de P_2O_5 como SFT al 46%; los demás nutrimentos se aplican como en el tratamiento de estrés por P en la Etapa I.

En el tratamiento de estrés por Al se aplican, por semestre, 500 kg/ha de CaCO_3 equivalente, y 200 kg/ha de P_2O_5 como SFT al 46%; los otros nutrimentos se aplican como en el tratamiento de estrés por P en la Etapa I.

Etapa III. Incluye los materiales (alrededor de 15, más los siete testigos de las etapas anteriores) que han sobresalido en la Etapa II. Se aplican aquí los mismos tratamientos descritos en la Etapa II. El tamaño de parcela de cada línea era de cinco hileras de 4 m de largo, con 60 cm de distancia entre ellas. El manejo agronómico es igual que para las Etapas I y II; se cosechan los tres surcos centrales y se registran los datos que se evaluaron en la Etapa II. El tratamiento sin estrés es el mismo de la Etapa II.

El tratamiento de estrés por P recibe 1000 kg/ha de CaCO_3 equivalente, 30 kg/ha de P_2O_5 como SFT al 46%, y los otros nutrimentos al igual que en las Etapas I y II, por semestre.

El tratamiento de estrés por Al recibe 400 kg/ha de CaCO_3 equivalente, 180 kg/ha de P_2O_5 como SFT al 46%, y los demás nutrimentos al igual que en las etapas anteriores, por semestre.

Es importante destacar que los niveles de estrés por P y por Al se establecieron para las condiciones de los Ultisoles de

Quilichao. Se recomienda por tanto el análisis completo de cada suelo antes de la siembra y después de cada cosecha, para cada situación particular.

Recolección de la información

a. Fenológica

1. Días a la germinación (cuando haya emergido el 50% de las plantas)
2. Tasa de germinación
3. Días a la floración
4. Días a la madurez fisiológica

b. Análisis de rendimiento

1. Número de plantas cosechadas
2. Número de vainas llenas por planta (muestra de cinco plantas por hilera)
3. Número de vainas por planta
4. Rendimiento (g/m^2) con una humedad del 14%.

Evaluación de los datos

Una evaluación estadística no daría resultados satisfactorios puesto que las diferencias en el rendimiento de los materiales son demasiado grandes. El principal objetivo es observar la estabilidad del rendimiento en las tres o cuatro repeticiones, dentro de un hábito de crecimiento.

En cada selección se siembran siempre las mismas líneas testigo. Estas se usan para medir la importancia relativa de las diferencias entre semillas, ya que el rendimiento está sujeto a diversas condiciones climatológicas, y los materiales estándar pueden usarse como un factor correctivo.

Antes de seleccionar los materiales para separarlos según sus características, se necesitan dos parámetros adicionales derivados del rendimiento así como el tratamiento que mida sus respuestas (R):

$$R_1 = \frac{(\text{Rend., parcelas sin estrés}) - (\text{Rend., parcelas con estrés})}{(\text{P}_2\text{O}_5 \text{ sin estrés, kg/ha}) - (\text{P}_2\text{O}_5 \text{ con estrés, kg/ha})}$$

$$R_2 = \frac{(\text{Rend., parcelas sin estrés}) - (\text{Rend., parcelas con estrés})}{(\text{Sat. Al con estrés, \%}) - (\text{Sat. Al sin estrés, \%})}$$

No se emplea la cantidad de P, en ppm, porque los datos del análisis químico dependen mucho de las condiciones hídricas y del tiempo transcurrido después de la aplicación.

Los materiales de un grupo (según el color del grano o su hábito de crecimiento) se pueden clasificar según el promedio de rendimiento de las parcelas con estrés de ese grupo.

La Figura 3 muestra una clasificación de las líneas según su eficiencia y su respuesta a la aplicación del fertilizante fosfórico. En el eje X se coloca el rendimiento de materiales bajo estrés por P, y en el eje Y se coloca su respuesta al fertilizante fosfórico.

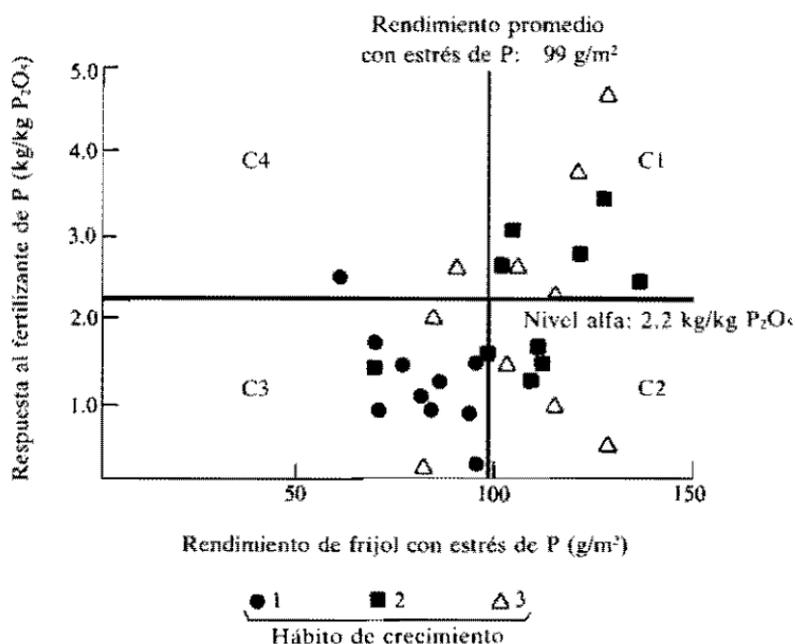


Figura 3. Evaluación de materiales de frijol según su eficiencia y su respuesta a la aplicación de fertilizantes fosfóricos en CIAT-Quilichao. C = categoría.

La línea promedio del rendimiento (en este caso, 99 g/m²) divide los materiales en dos grupos. Los de la izquierda son ineficientes, mientras que los de la derecha son eficientes. La línea α del promedio (en este caso, 2.2 kg/kg P₂O₅) separa los materiales con respuesta (arriba de la línea) de los materiales sin respuesta (debajo de la línea). De esta manera podemos clasificar las líneas mejoradas en cuatro categorías:

1. **Líneas eficientes con buena respuesta:** son plantas de buen rendimiento tanto en condiciones de estrés de P, como bajo un suministro adecuado de P.
2. **Líneas eficientes sin respuesta:** estas plantas producirán bien bajo un estrés de P, pero no producirán igual que otras plantas bajo condiciones óptimas de disponibilidad de P.
3. **Líneas ineficientes sin respuesta:** estas son plantas genéticamente pobres, que no producen bien bajo condiciones adecuadas o inadecuadas de P.
4. **Líneas ineficientes de buena respuesta:** son plantas que producen menos bajo estrés de P, pero que producen la misma cantidad o más que la planta eficiente si disponen del P adecuado.

Las líneas de la categoría 3 se descartan inmediatamente, y las de la categoría 2 pueden pasar directamente a los pequeños agricultores que no tienen la costumbre de fertilizar o no son capaces de hacerlo. Las líneas de la categoría 4 se pueden entregar a los agricultores que usan fertilizantes, si el valor económico de los materiales es aceptable. Las líneas de la categoría 1 pueden pasar directamente a los pequeños agricultores. Estos materiales se usan como fuente de tolerancia o eficiencia en el programa, para mejorar otras líneas que tengan resistencia a algunas enfermedades importantes.

Es interesante notar que los resultados obtenidos confirman el postulado de Lyness (1936), según el cual "los materiales más eficientes bajo condiciones adversas no son necesariamente los mejores en óptimas condiciones".

El efecto del N en la selección es también muy importante. Si se efectúa la selección con un suministro inadecuado de N, la respuesta de las variedades al fertilizante fosfórico se confunde con el efecto negativo por N (Figura 4).

A través de esta evaluación se escogieron solamente materiales que tenían características de eficiencia en condiciones de estrés por P, una buena respuesta a la fertilización fosfórica, o que poseían buenas características para tolerar niveles moderados de toxicidad por Al y por Mn. Hay una correlación positiva entre las líneas condicionadas al estrés por fósforo y aquellas tolerantes a la toxicidad por Al y Mn, respecto a su rendimiento potencial.

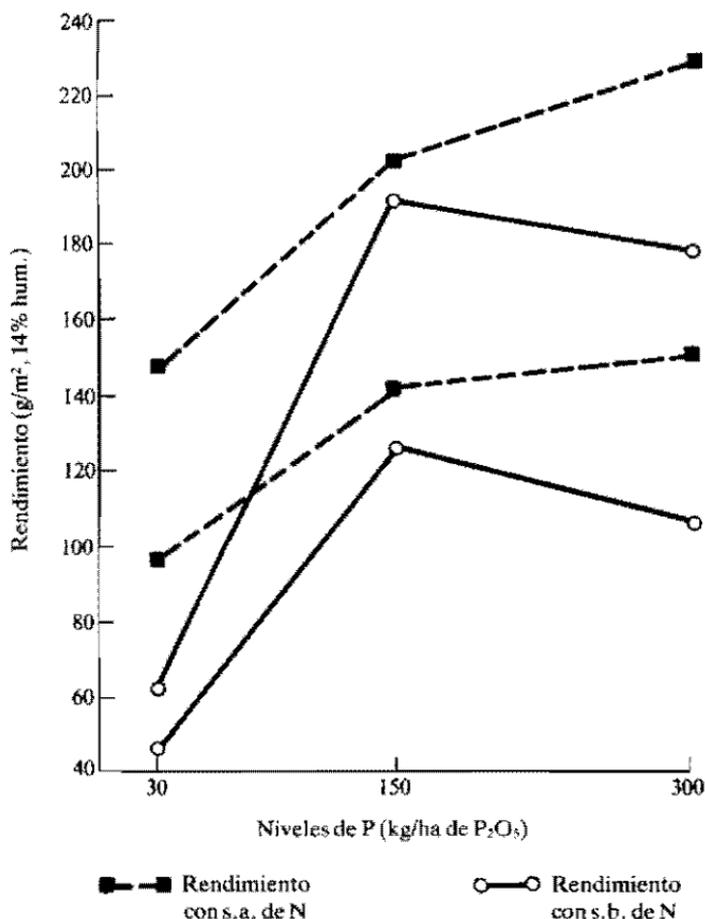


Figura 4 Rango de la respuesta del frijol a los diversos niveles de P cuando es afectada por diferentes niveles de N. hum. = contenido de humedad; s.a. = suministro adecuado; s.b. = suministro bajo.

Evaluación conjunta para obtener materiales tolerantes a condiciones edáficas adversas

Estas líneas deben reunir todas las características deseables: eficiencia en el uso del P presente en el suelo, respuesta a la aplicación de fertilizantes fosfóricos, tolerancia a la toxicidad moderada del aluminio, y respuesta al encalamiento.

En la Figura 5 se pueden evaluar e identificar las líneas con estas características deseables. Las líneas de la categoría E1 se identifican como tolerantes a las condiciones de suelos ácidos. La mayoría de los materiales identificados hasta el momento

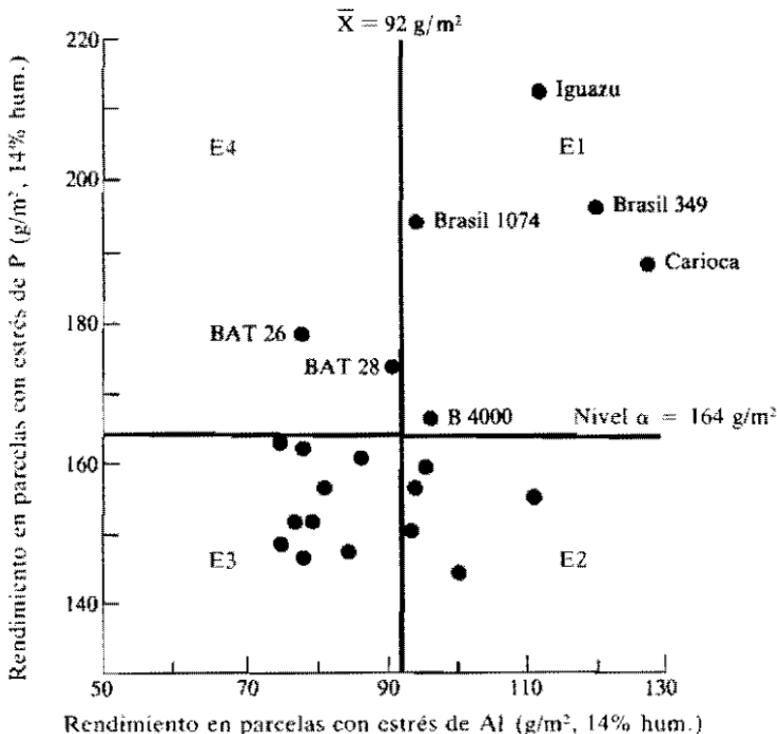


Figura 5. Evaluación para obtener materiales tolerantes a las condiciones adversas del suelo. hum. = humedad; E = categoría de evaluación conjunta.

como tolerantes son de origen brasileño; en Brasil se han adaptado a condiciones adversas del suelo.

Estos resultados muestran la efectividad de este sistema de selección de CIAT-Quilichao, donde el Al y el Mn están afectando también la producción del fríjol.

Referencias

- Arminger, W. H.; Foy, C. D.; Fleming, A. L. y Caldwell, B. E. 1968. Differential tolerance of soybean varieties to an acid soil high in exchangeable aluminum. *Agron. J.* 60:67-70.
- Cobra Neto, A. 1967. Adsorção e deficiências dos macronutrientes pelo feijoeiro. Tesis (Ph.D.). G.S.A. Piracicaba, São Paulo, Brasil.
- FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations). 1976. Anuario de producción. v. 29. Roma, Italia.

- Fleming, A. L. y Foy, C. D. 1968. Root structure reflects differential aluminum tolerance in wheat varieties. *Agron. J.* 60:172-176.
- Foy, C. D. 1974. Effects of aluminum on plant growth. En: Carson, E. W. (ed.). *The plant root and its environment*. University Press of Virginia, Univ. Station, Charlottesville, VA, E. U. p. 601-642.
- Haag, H. P. et al. 1967. Absorção de nutrientes pela cultura do feijoeiro. *Bragantia* 26(30):381-391.
- Hanson, W. D. y Kamprath, E. J. 1979. Selection for aluminum tolerance in soybean based on seedling-root growth. *Agron. J.* 71:581-586.
- Jacob, A. y Vexkuell, H. V. 1963. *Fertilizer use, nutrition and manuring of tropical crops*. 3 ed. Verlagsgesellschaft für Ackerbaumbh. Hanover, Alemania Federal. 566 p.
- Kick, H. y Minhas, R. S. 1982. Die verfügbarekeit der durch langjaehrige duengung im boden angereicherten phosphaten. *Landwirtsch. Forsch. Sonderh.* 22:184-191.
- Lépiz, R. 1977. Programa Nacional de Frijol; informe 1977. Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, Instituto Nacional de Investigaciones Agrícolas (INIA), México.
- Lyness, A. S. 1936. Varietal differences in the phosphorus feeding capacity of plants. *Plant Physiol.* 11:665-668.
- MacLeod, L. B. y Jackson, L. P. 1967. Aluminum tolerance of two barley varieties in nutrient solution, peat and soil culture. *Agron. J.* 59:359-363.
- Müller, J.; Ballerdi, F.; Diaz-Romeu, R. y Fassbender, H. W. 1968. Estudio del fósforo en suelos de América Central: Ubicación, características físicas y químicas. *Turrialba* 18:319-332.
- Pearson, R. W. 1975. Soil acidity and liming in the humid tropics. *Cornell Int. Agric. Bull.* 30. Cornell University, Ithaca, NY, E.U.
- Polle, E.; Konzack, C. F. y Kittrick, J. A. 1978. Rapid screening of wheat for tolerance to aluminum in breeding varieties better adapted to acid soils. *AID Technical Series Bull.* 21.
- Reid, D. A.; Fleming, A. L. y Foy, C. D. 1971. A method for determining aluminum response of barley in nutrient solution in comparison to response in Al-toxic soil. *Agron. J.* 63:600-603.
- Scheffer, F. y Schachtschabl, P. 1970. *Lehrbuch der Bodenkunde*. 7 ed. F.Enke Verlag, Stuttgart. República Federal de Alemania. 443 p.
- van Goor, B. J. y Wiersna, D. 1974. Redistribution of potassium, calcium, magnesium, and manganese in the plant. *Plant Physiol.* 31:163-168.

Colección Mundial del Germoplasma de Sorgo y su Conservación

*Vartan Guiragossian y Melak H. Mengesha**

Introducción

La importancia del germoplasma en cualquier trabajo de mejoramiento de cultivos es un hecho bien establecido. El propósito principal y la responsabilidad de la Unidad de Recursos Genéticos del International Crops Research Institute for the Semi-Arid Tropics (ICRISAT) es recoger y preservar el germoplasma perecedero y hacerlo fácilmente disponible para su utilización presente y futura. El germoplasma se debe mantener, tanto como sea posible, igual a su forma original y a su constitución genética. La evaluación sistemática y la documentación son trabajos muy importantes y necesarios, ya que nos ayudan a conocer y a clasificar el material recogido; también nos facilitan la identificación y la recuperación de líneas útiles de germoplasma para su adecuada distribución y utilización.

Ultimamente, el ICRISAT ha intentado, mediante cuestionarios, establecer el valor y el uso del germoplasma que se ha suministrado a muchos programas de fitomejoramiento en los trópicos semiáridos. La respuesta que se ha recibido hasta el momento es muy alentadora. Los resultados de este estudio se están analizando y compilando para circularlos.

El origen y la primera domesticación del sorgo tuvieron lugar, probablemente, en el cuadrante nororiental de Africa, en un área que se extiende, desde la frontera entre Etiopía y Sudán, hacia el oeste, hasta Chad (Dogget, 1970; Harlam, 1971). Otras áreas en Africa occidental y Asia son también centro de diversidad muy importantes.

* Respectivamente: mejorador de sorgo para América Latina, Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo (CIMMYT), El Batán, México; líder de la Unidad de Recursos Genéticos, International Crops Research Institute for the Semi-Arid Tropics (ICRISAT), Patancheru, India.

Colección

La labor de recolección mundial de germoplasma de sorgo en el ICRISAT se está desarrollando actualmente a un paso muy acelerado. También continuamos la búsqueda de accesiones faltantes de la colección mundial que están en otros bancos de germoplasma. Además de la colección ya establecida, se introdujeron 10,688 nuevas accesiones de 79 países después de organizar expediciones de recolección en áreas prioritarias, y por medio de correspondencia. Con estas nuevas adiciones, la colección de germoplasma de sorgo en el ICRISAT ha alcanzado un total de 22,466 accesiones (Cuadro 1). Además, se han obtenido recientemente 2697 accesiones nuevas de 12 países, las cuales están bajo cuarentena para su liberación en 1984. Cuando estas líneas se liberen, la colección en ICRISAT alcanzará un total de 25,163 accesiones.

Cuadro 1. Germoplasma de sorgo reunido en ICRISAT, hasta enero 1983.

Origen	Accesiones (no.) reunidas por: ^a		Total
	Fundación Rockefeller	ICRISAT, IBPGR, ORSTOM, P.N.	
Africa			
Angola	23	6	29
Africa del Sur	483	243	726
Benin	1	3	4
Botswana	28	162	190
Burkina Faso	160	88	248
Camerún	1753	82	1835
Costa de Marfil	1	-	1
Chad	125	13	138
Egipto	15	7	22
Etiopía	1446	2796	4242
Ghana	11	53	64
Kenya	313	448	761
Lesotho	-	8	8
Malawi	58	379	437
Mali	95	16	111
Marruecos	-	3	3
Mozambique	-	42	42
Namibia	-	1	1
Niger	25	383	408
Nigeria	897	276	1173
República Central de Africa	37	2	39
República Malgache	-	1	1

(Continúa)

Cuadro 1. Continuación.

Origen	Accesiones (no.) reunidas por: ^a		Total
	Fundación Rockefeller	ICRISAT, IBPGR, ORSTOM, P.N.	
Senegambia	12	282	294
Sierra Leona	-	3	3
Somalia	5	120	125
Sudán	855	1401	2256
Swazilandia	18	1	19
Tanzania	31	401	432
Uganda	471	141	612
Zaire	24	-	24
Zambia	3	207	210
Zimbabwe	123	63	186
Asia			
Afganistán	5	1	6
Arabia Saudita	-	1	1
Bangladesh	-	9	9
Burma	2	6	8
China	24	44	68
Filipinas	1	4	5
India	2732	1406	4138
Indonesia	6	26	32
Irán	6	1	7
Iraq	2	2	4
Israel	22	-	22
Japón	106	5	111
Korea del Sur	2	-	2
Líbano	-	360	360
Nepal	7	1	8
Pakistán	18	11	29
República Árabe de Yemen	-	216	216
República Democrática Popular de Yemen	-	1	1
Sri Lanka	-	25	25
Siria	-	4	4
Taiwán	12	1	13
Tailandia	5	-	5
Turquía	1	50	51
Unión Soviética (URSS)	5	64	69
Europa			
Bélgica	-	1	1
Chipre	1	-	1
España	-	3	3
Francia	5	-	5
Grecia	1	-	1
Hungría	-	26	26
Italia	8	-	8

(Continúa)

Cuadro 1. Continuación.

Origen	Accesiones (no.) reunidas por: ^a		Total
	Fundación Rockefeller	ICRISAT, IBPGR, ORSTOM, P.N.	
Portugal	-	6	6
Reino Unido	-	1	1
República Democrática Alemana	-	4	4
América			
Argentina	2	14	16
Cuba	1	2	3
El Salvador	-	1	1
Estados Unidos de América	1208	671	1879
Guatemala	-	6	6
Honduras	-	1	1
Indias Occidentales	-	3	3
México	207	27	234
Nicaragua	-	1	1
Uruguay	-	1	1
Venezuela	-	1	1
Australia y Oceanía			
Australia	6	22	28
Papuasía-Nueva Guinea	-	1	1
Desconocido	370	27	397
Total	11,778	10,688	22,466

a. IBPGR = International Board for Plant Genetic Resources; ORSTOM = Office de la Recherche Scientifique et Technique d'Outre-Mer, Francia; P.N. = Programas nacionales.

Tipos de colecciones mantenidos en el ICRISAT

Los diferentes tipos de colección que reciben mantenimiento han sido identificados y descritos por varios autores, comités y organizaciones (House, 1981). La Fundación Rockefeller y el Proyecto para el Mejoramiento de Sorgo de la India han hecho un papel importante en las etapas iniciales (Rao, 1972; Rockefeller, 1970). Actualmente, el ICRISAT (Mengesha, 1981) ha tomado la responsabilidad de la colección mundial de sorgo, de su mantenimiento, y de su conservación.

Colección de accesiones. Este tipo incluye la colección mundial disponible; todas las nuevas accesiones se añaden a esta

colección. Hasta el momento hay 22,466 accesiones, cada una representada por una muestra de 500 g.

Colección básica. Esta es una colección de 1245 accesiones seleccionadas de la colección mundial, con una estratificación basada en razas taxonómicas, distribución geográfica y adaptación ecológica a la localidad de Patancheru, India. Colecciones básicas similares se deben formar en otras áreas. Este material se está observando y usando actualmente por los mejoradores de sorgo en ICRISAT, lo mismo que en Camerún, Guatemala, India, Japón, Mali, Uganda, Burkina Faso (antes Alto Volta) y los Estados Unidos de América.

Colección espontánea. Esta consta de los parientes silvestres y de las razas no cultivadas del sorgo. Hasta el momento hemos podido mantener 278 accesiones de 13 taxones diferentes.

Colección masal ('bulks'). Estamos ahora en la etapa inicial de las mezclas masales. La colección requiere una observación y evaluación cuidadosas antes de mezclar materiales similares para hacer cierto número de colecciones masales. House (1981) sugirió que las entradas de una mezcla masal deberían ser similares en su origen, altura, madurez y adaptación. Estamos seleccionando ahora diferentes series de materiales similares en el programa de conversión para mantenerlas como mezclas masales.

Colección de cultivares nombrados. Esta colección incluye actualmente sólo 237 cultivares nombrados y liberados.

Colección de reserva genética. Este material incluye el germoplasma de genotipos conocidos que son de valor especial como fuente de ciertas características deseables, como la resistencia a enfermedades específicas. Cada muestra se mantiene por autopolinización para obtener una reserva de aproximadamente un kilo, excepto para las líneas estériles masculinas; éstas se pueden mantener por polinización manual entre las correspondientes líneas masculina estéril y mantenedora.

Las reservas genéticas mantenidas por la Unidad de Recursos Genéticos en ICRISAT aparecen a continuación:

Líneas promisorias con resistencia a la mosca del fruto	556
Líneas promisorias con resistencia al perforador de tallos	212
Líneas promisorias con resistencia a la mosca del cogollo	60
Líneas promisorias con resistencia a los áfidos	9
Líneas menos susceptibles a los hongos del grano	515
Líneas menos susceptibles al añublo foliar	35

Líneas menos susceptibles a la antracnosis	124
Líneas menos susceptibles a la roya	43
Líneas menos susceptibles al moho veloso	95
Líneas promisorias resistentes a la sequía	246
Líneas cerosas	501
Líneas de sorgo reventón	36
Líneas de sorgo de tallo dulce	41
Líneas de sorgo aromático	17
Líneas de semilla gemela	131
Líneas de glumas grandes	71
Líneas citoplasmáticas AB	186

Todos los materiales resistentes se mantienen de acuerdo con las sugerencias de las disciplinas entomología, patología y mejoramiento, y muchas están aún bajo análisis.

Colección de conversión. Siguiendo la recomendación hecha en 1976 por el Comité Asesor del IBPGR para Germoplasma de Sorgos y Millos (IBPGR, 1976), hemos mantenido 176 líneas convertidas obtenidas de la Universidad de Texas A & M y del Programa de Conversión del USDA. El programa de conversión del ICRISAT pronto producirá líneas convertidas adicionales de germoplasma tropical.

Colecciones especiales. Estas colecciones se reúnen para conservar líneas importantes que han sido seleccionadas y desarrolladas por su especial calidad por varios mejoradores de sorgo. Hasta el momento tenemos dos colecciones de éstas en el ICRISAT. Sabemos que hay muchas otras colecciones invaluablemente mantenidas por varios científicos y esperamos poder ensamblarlas y mantenerlas en el ICRISAT.

Vivero Karper. Este vivero fue desarrollado por el Dr. R. E. Karper en Texas, Estados Unidos, después de la introducción del germoplasma de endosperma amarillo 'kaura' de Nigeria del Norte. Estas líneas son cortas y básicamente insensibles al fotoperíodo. Se les asignaron números Indian Selection (IS) y forman parte de la colección mundial.

Vivero ALAD. Este es el material organizado por el Programa para el Desarrollo Agrícola de las Tierras Áridas (ALAD) cuya base estaba anteriormente en Líbano; fue desarrollado por el Dr. L. R. House y sus colegas en la Estación de Tel Amara en el Líbano. Algunos de los materiales 'kauras' de endospermo amarillo del vivero de Karper formaron el material básico de este vivero. Cuando House dejó el Líbano, esta colección fue

enviada al ICRISAT para su mantenimiento. Hay 1674 accesiones en este vivero.

Áreas futuras de colección

Las áreas prioritarias para la recolección futura del germoplasma de sorgo son las siguientes, presentadas por Mengesha y Rao (1981):

Asia	— Nepal, Birmania, Indonesia, India, Pakistán;
Africa Oriental	— Etiopía (áreas aisladas), Sudán del Sur, Uganda, Kenya, Mozambique, Zimbabwe;
Africa Occidental	— Sierra Leona, Ghana, Togo, Costa de Marfil, Chad, Benin, Mauritania, Burkina Faso;
Otras áreas	— Yemen del Norte y del Sur, China, Turquía, Siria, República Central de Africa, Congo, Zaire, Angola, Marruecos, Arabia Saudita y América Latina.

Las áreas prioritarias se identifican en colaboración con los científicos de FAO/IBPGR, de ICRISAT, y con varios científicos internacionales y nacionales que trabajan en el área de recursos de germoplasma. Anualmente se identifican nuevas e importantes áreas de recolección. Las colecciones actuales dependen de varios factores como permisos gubernamentales, recursos financieros, organizaciones nacionales colaboradoras, ambiente, y otros problemas de logística.

Evaluación

En ICRISAT. Hasta el momento se han evaluado más de 19,000 accesiones (IBPGR e ICRISAT, 1980) para estudiar importantes caracteres morfoagronómicos. Los descriptores de sorgo publicados en el informe antes citado promoverán una evaluación más sistemática y uniforme y un intercambio de información alrededor del mundo. La variación que tenemos en el germoplasma de sorgo está resumida en el Cuadro 2. Esta diversidad, cuyo rango sigue creciendo, se considera como el aspecto más importante de la colección y utilización del germoplasma.

Cuadro 2. Rango de variación en la colección de germoplasma de sorgo reunida hasta hoy.

Carácter	Valor del rango	
	Mínimo	Máximo
Días hasta el 50% de la floración	36	199
Altura de la planta (cm)	55	655
Excursión del pedúnculo (cm)	0	55
Color de la nervadura	Blanco	Café
Longitud de la panícula (cm)	2.5	71
Anchura de la panícula (cm)	1	29
Color de las glumas	Pajizo	Negro
Cobertura de las glumas	Expuesta	Cubierta
Color del grano	Blanco	Café oscuro
Tamaño del grano (mm)	1	7.5
Peso de 100 granos (g)	0.58	8.56
Macollas (no.)	1	15
Contenido de azúcar en el tallo (%)	12	38

La selección de germoplasma de sorgo para buscar resistencia a insectos, a *Striga*, a las enfermedades y a la sequía, calidad del grano, y otras características se está llevando a cabo en colaboración con otras disciplinas. Los resultados del trabajo de evaluación y selección de las líneas de sorgo se muestran en el Cuadro 3.

Evaluación regional. La evaluación del germoplasma de sorgo en la estación lluviosa (kharif) en Patencheru, India, no puede suministrar información completa, ya que la mayor parte del germoplasma tropical es sensible al fotoperíodo. El problema de evaluar este germoplasma ha sido estudiado por varios investigadores (Dalton, 1970; Eberhart, 1970; Mengesha y Rao, 1981; Webster, 1975). Por esta razón se ha dado bastante importancia a la evaluación del germoplasma en múltiples localidades o tan cerca como se pueda del habitat original. Este proyecto se llevará a cabo en centros regionales seleccionados y en colaboración con programas nacionales.

En 1983 evaluamos con mucho éxito la colección completa de germoplasma de sorgo de Etiopía (5155 accesiones) en Nazareth y en Arsinegelle, en Etiopía. El trabajo fue hecho en colaboración estrecha con el Centro Etíope de Recursos Genéticos (PGRC/E) y con el Proyecto Etíope para el Mejoramiento de Sorgo, con el apoyo financiero de la Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ) de Alemania Federal.

Cuadro 3. Resultados de la evaluación y selección del germoplasma de sorgo.

Selección respecto a:	Accesiones, A (no.)	Líneas promisorias, LP (no.)	A y LP identificadas y descritas por:
Resistencia a insectos			
Mosca del cogollo	11,287	556	Entomología de sorgo
Barrenador del tallo	15,724	212	Entomología de sorgo
Mosca del vástago	5,200	60	Entomología de sorgo
Resistencia a enfermedades			
Moho del grano	16,209	515	Patología de sorgo
Enfermedades foliares			
Añublo	8,978	35	Patología de sorgo
Antracnosis	2,317	124	Patología de sorgo
Roya	602	43	Patología de sorgo
Moho vellosa	2,459	95	Patología de sorgo
Resistencia a la sequía	1,752	246	Fisiología y mejoramiento de sorgo
Otros caracteres			
Resistencia a <i>Striga</i>	15,754	645	Mejoramiento de sorgo
Cerosidad	15,260	501	Fisiología de sorgo y recursos genéticos
Sorgo reventón	2,694	36	Mejoramiento de sorgo
Tallos dulces	7,200	41	Recursos genéticos, bioquímica, y fisiología del sorgo

Documentación

Datos tabulados para 7114 números IS fueron computadorizados en la estación IS/GR, en Colorado, Estados Unidos, utilizando el programa EXIR de recuperación rápida. Los mismos datos fueron trasferidos al computador de ICRISAT mediante una cinta magnetofónica, y se obtuvo un listado de computador en forma de catálogo. Además de los datos ya computadorizados, se han tabulado, para introducir al computador, los datos de evaluación de descriptores importantes, con información de pasaporte, para los IS de 10051 en adelante. Al final de 1984, todos los datos sobre evaluación de germoplasma de sorgo entrarán al computador para su recuperación y para análisis de diversidad.

Rejuvenecimiento y Mantenimiento

Las muestras que alcanzan el nivel crítico de cantidad o que caen por debajo de un 85% de viabilidad son rejuvenecidas con el máximo cuidado para evitar alterar el genotipo original. Sin embargo, es inevitable un ligero cambio con cada regeneración. El método más práctico y manejable para mantener la pureza genética del sorgo durante la regeneración consiste en autopolinizar 20 panículas representativas de cada línea, y mezclar las semillas autopolinizadas. Después de un secamiento controlado, se almacena una muestra masal de 0.5 a 1.0 kg. La necesidad de regeneraciones frecuentes se minimiza con prácticas adecuadas de conservación.

Conservación

La conservación del germoplasma es tan importante como su recolección. Una vez que el germoplasma ha sido recogido, se debe preservar con técnicas apropiadas tales como las detalladas por el IBPGR (1979 y 1982). Los siguientes son los pre-requisitos para un sistema adecuado de conservación de germoplasma:

- Las semillas deben estar limpias y libres de material extraño.
- Las semillas se deben secar en un cuarto especial con temperatura baja y con humedad relativa baja. Los estándares recomendados para el cuarto de secado son 15 °C y 15% de humedad

relativa (IBPGR, 1982). El contenido de humedad de la semilla de sorgo alcanza el equilibrio aproximadamente a 6.4% cuando la humedad relativa es de 15% (Roberts, 1974). La temperatura recomendada puede ser muy baja para ser práctica. Justice y Bass (1978) discutieron varios métodos para determinar y reducir el contenido de humedad de las semillas en almacenamiento; establecieron ellos que el contenido de humedad de la semilla juega un papel muy importante en su longevidad. Las semillas se deben esparcir adecuadamente en las bandejas durante el almacenamiento.

- La viabilidad o el porcentaje de germinación se deben registrar al comienzo, y se continúa revisándolos sistemáticamente durante el almacenamiento. Esta información se necesita para decidir la extensión y el intervalo del rejuvenecimiento.
- Una temperatura de 4 °C se considera apropiada para un almacenamiento a mediano plazo; para el almacenamiento a largo plazo es necesario bajar la temperatura hasta -18 °C (Ellis et al., 1980).
- Se debe almacenar una cantidad suficiente de semillas para garantizar una representación genotípica, para controlar la viabilidad, y para distribuir el germoplasma. En ICRISAT mantenemos, aproximadamente, 500 g de cada accesión en un almacenamiento activo a mediano plazo. El IBPGR (1982) ha recomendado almacenar aproximadamente 12,000 semillas de material heterogéneo y aproximadamente 4000 semillas de material homogéneo cuando se trata de almacenamiento básico a largo plazo.
- Los recipientes de almacenamiento se deben seleccionar cuidadosamente. En el ICRISAT hemos adquirido recipientes de aluminio con tapa hermética para el almacenamiento a largo plazo y con tapa a prueba de aire para el almacenamiento en frío a mediano plazo. Las botellas plásticas con tapa de rosca, en uso actualmente, serán remplazadas a su debido tiempo.
- Cámaras de almacenamiento: En el ICRISAT estamos construyendo cuartos modulares aislados por paredes, techos y pisos de poliuretano de 10 cm de grosor. El piso tiene un acabado de hoja de aluminio galvanizado para trabajo pesado. Las cámaras se ensamblan en un cuarto más grande de concreto. Las cámaras para almacenamiento en frío a mediano plazo se mantienen aproximadamente a un 30% de humedad relativa mediante un deshumidificador Rotair Modelo No. 300.

Se han montado compresores de 3 HP de capacidad y condensadores enfriados por aire en la parte superior de la cámara de almacenamiento, para ofrecer aire frío; éste circula constantemente por medio de ventiladores de hélice. Cada cámara está equipada con un panel de control para hacer operaciones manuales o automáticas confiables y efectivas.

- Conservación doble: por seguridad y facilidad de distribución, es aconsejable almacenar la colección mundial, por lo menos, en dos localidades. Actualmente hay colecciones de sorgo almacenadas en diferentes lugares del mundo. De acuerdo con Anishetty et al. (1981), existen colecciones de sorgo relativamente grandes mantenidas en los lugares presentados en el Cuadro 4. Se han hecho intentos para obtener detalles de las diferentes colecciones y trasferir muestras de esa semilla al banco de germoplasma del ICRISAT.

Existe un plan para mantener y conservar el germoplasma mundial de sorgo en cuatro regiones del mundo, además de las dos de ICRISAT y Fort Collins, Colorado, E.U. La próxima colección regional se puede mantener en Níger. La segunda se ha propuesto para América Central. Estas colecciones regionales se justifican ya que cada vez es más difícil trasferir germoplasma de una región a otra debido, principalmente, a las limitaciones de cuarentena.

Introgresión y Conversión

La conversión de un sorgo alto, sensible al fotoperíodo, en otro insensible a éste y de porte bajo es una herramienta muy útil para el flujo fácil y efectivo de germoplasma tropical hacia varios programas de mejoramiento de sorgo (Dalton, 1970; Eberhart, 1970; House, 1981; Stephens et al., 1967; Webster, 1975). Actualmente estamos en el proceso de convertir las razas 'Zera-zera' de Sudán y Etiopía, que son muy deseadas por sus características agronómicas superiores pero cuyo uso está restringido por su sensibilidad al fotoperíodo y por su altura de planta. Las poblaciones F₃ de estas razas nativas parcialmente convertidas han producido segregantes promisorios, como se indica enseguida:

- se mantuvo la característica deseable de la panícula Zera-zera;
- se observó un mejoramiento en el rendimiento de grano y en su calidad;

- los materiales tropicales sensibles al fotoperíodo se convirtieron exitosamente en materiales insensibles a él;
- la altura de la planta se redujo aproximadamente a la mitad de la de las razas originales.

Hemos iniciado recientemente un programa de introgresión cruzando *S. propinquum* y un cultivar promisorio de sorgo (IS 18758 conocido como E35-1) de Gambella, Etiopía. Los resultados preliminares de este trabajo son promisorios.

Cuadro 4. Principales colecciones de germoplasma de sorgo.

País y entidad*	Tipo de colección	Accesiones (no.)	Observaciones
Argentina, INTA	activa	2,700	
Australia	activa	1,000	
China, CAAS	activa	3,000	
Colombia, ICA	sin especificar	912	
Etiopía	razas nativas y cultivares	5,000	duplicada en ICRISAT
Francia, ORSTOM	razas nativas, tipos silvestres y salvajes	2,626	parcialmente trasferida
Francia, INRA	cultivar, enano, forraje, y grano	400	
India, NBPGR	razas nativas	2,000	
India, ICRISAT	colección mundial	22,466	duplicada en NSSL
Japón	razas nativas y cultivares	466	
Malagasy	sin especificar	300	
Malawi, Chitedze	razas nativas y tipos silvestres	483	
México, INIA	cultivares introducidos	3,000	
Rumania	razas nativas, tipos silvestres y salvajes	4,900	
Tailandia	sin especificar	1,500	
Unión Soviética, Vavilov Institute	razas nativas, cultivares, y tipos silvestres	9,615	

(Continúa)

Cuadro 4. Continuación.

País y entidad ^a	Tipo de colección	Accesiones (no.)	Observaciones
Estados Unidos, NSSL	razas nativas cultivares, y tipos silvestres	15,000	duplicada en ICRISAT
Estados Unidos, Mississippi	sorgo dulce, y otros	4,610	
Estados Unidos, Puerto Rico	razas nativas y cultivares	4,000	duplicada en ICRISAT
Venezuela	razas nativas y cultivares	494	
República Árabe de Yemen	indígena e introducida	4,000	

- a. CAAS = Chinese Academy of Agricultural Sciences
ICA = Instituto Colombiano Agropecuario
ICRISAT = International Crops Research Institute for the Semi-Arid Tropics
INIA = Instituto Nacional de Investigaciones Agrícolas
INRA = Institut National de Recherches Agronomiques
INTA = Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria
NBPGR = National Bureau of Plant Genetic Resources
NSSL = National Seed Storage Laboratory
ORSTOM = Office de la Recherche Scientifique et Technique d'Outre-Mer

Resumen

El germoplasma es la materia prima más importante para cualquier programa de mejoramiento de cultivos; aun así, la posible extinción de este recurso invaluable es una realidad que el mundo debe encarar. Uno de los principales objetivos de la unidad de recursos genéticos de ICRISAT es recoger y preservar este germoplasma y tenerlo disponible para su utilización presente y futura. El germoplasma se debe mantener, tanto como sea posible, fiel a su forma original y a su constitución genética. La colección de germoplasma de sorgo en el ICRISAT ha alcanzado 25,163 accesiones. La evaluación sistemática y la documentación de estas accesiones es muy importante porque puede ayudarnos a conocer y clasificar el material recogido. También facilita la identificación y la recuperación de líneas de germoplasma útil para su distribución y utilización adecuada.

Referencias

- Anishetty, M. N.; Ayad, W. G. y Toll, J. 1981. Directory of germplasm collections; 3: Cereals, IV: Sorghum and millets AGP:IBPGR 181/55. International Board for Plant Genetic Resources (IBPGR), Secretaría, Roma, Italia.
- Dalton, L. G. 1970. The use of tropical germplasm in sorghum improvement. En: Proceedings of the 25th annual corn and sorghum research conference. American Seed Trade Association, Washington, DC, E.U. p. 21-27.
- Doggett, H. 1970. Sorghum. Longmans Green and Co., Londres, Inglaterra. p. 1-48.
- Eberhart, S. A. 1970. Progress report on the sorghum conversion program in Puerto Rico and plans for the future. En: Proceedings of the 25th annual corn and sorghum research conference. American Seed Trade Association, Washington, DC, E.U. p. 41-54.
- Ellis, R. H.; Roberts E. H. y Whitehead, J. 1980. A new, more economic and accurate approach to monitoring the viability of accessions during storage in seed banks. Plant Genetic Resources Newsletter. AGP:IBPGR/41. IBPGR, Secretaría, Roma, Italia.
- Frankel, O. H. 1975. Genetic resources survey as basis for exploration. En: Frankel, O. H. y Hawkes, J. G. (eds.). Crop genetic resources for today and tomorrow. Cambridge University Press, Cambridge, Inglaterra. p. 99-109.
- Harlan, J. R. 1971. Agricultural origins: Centers and noncenters. Science 174:468-474.
- . 1972. Genetic resources in sorghum. En: Rao, Ganga Prasada, N. y House, L. R. (eds.). Sorghum in the seventies. Oxford and IBH Publishing Co., Nueva Delhi, India. p. 1-13.
- . 1975. Our vanishing genetic resources. Science 188:618-621.
- y Stemler, A. 1976. The races of sorghum in Africa. En: Sal Tax (ed.). Origin of African plant domestication. Mouton Publishers, The Hague, Holanda. p. 465-478.
- House, L. R. 1981. A guide to sorghum breeding. International Crops Research Institute for the Semi-Arid Tropics (ICRISAT), Patancheru A. P., India. 101 p.
- IBPGR (International Board for Plant Genetic Resources). 1976. Report of the first meeting of the Advisory Committee on Sorghum and Millets Germplasm. AGP:IBPGR/76/17. IBPGR, Secretaría, Roma, Italia.

- . 1979. Seed technology for gene banks. AGP:IBPGR/79/41. IBPGR, Secretaría, Roma, Italia.
- . 1982. IBPGR ad hoc advisory committee on seed storage: Report of the first meeting. AGP:IBPGR/81/73. IBPGR, Secretaría, Roma, Italia.
- . e ICRISAT (International Crops Research Institute for the Semi-Arid Tropics). 1980. Sorghum descriptors. AGP:IBPGR/80/1. IBPGR, Secretaría, Roma, Italia.
- Justice, O. L. y Bass, L. N. 1978. Principles and practices of seed storage. En: USDA (United States Department of Agriculture). Agricultural handbook no. 506. U.S. Government Printing Office, Washington, DC, E.U. p. 21-56.
- Mengesha, M. H. y Rao, G. P. N. 1981. Current situation and future of sorghum germplasm. En: Sorghum in the eighties. Proceedings of the International Symposium on Sorghum, noviembre 1981. ICRISAT, Patancheru, A. P., India. p. 323-333.
- Murty, B. R.; Arunachalam, V. y Saxena, M. B. L. 1967. Classification and catalogue of a world collection of sorghum. Indian J. of Genet. Plant Breed. 27:1-312. (Número especial.)
- Rao, Ganga Prasade N. 1972. Sorghum breeding in India: Recent development. En: Rao, Ganga Prasade, N. y House, L. R. (eds.). Sorghum in the seventies. Oxford y IBH publishing Co., Nueva Delhi, India. p.101-142.
- Roberts, E. H. 1974. Viability of seeds. Chapman and Hall, Londres, Inglaterra. p. 424-437.
- Rockefeller Foundation. 1970. World collections of sorghums, list of pedigrees and origins. Rockefeller Foundation, Indian Agricultural Program, Nueva Delhi, India.
- Stephens, J. C.; Miller, F. R. y Rosenow, D. T. 1967. Conversion of alien sorghums to early combine genotypes. Crop Sci. 7:396.
- Webster, O. J. 1975. Use of tropical germplasm in a sorghum breeding program for both tropical and temperate areas. En: Proceedings of the 30th annual corn and sorghum research conference. American Seed Trade Association, Washington, DC, E.U. p. 1-12.

Planes para Mejorar el Sorgo respecto al Uso Eficiente del Fósforo

*N. Seetharama, K.R. Krishna, T.J. Rego y J.R. Burford **

Introducción

La deficiencia de fósforo (P) es común en las regiones de los trópicos semiáridos (TSA) donde se cultiva el sorgo (Sallanpaa, 1982), y es la segunda en importancia después de la deficiencia del nitrógeno (N). Además de la deficiencia de estos dos nutrientes, es común la presencia de otros desórdenes nutricionales; por ejemplo, la deficiencia de zinc (Zn) es común en la India, la deficiencia de potasio (K) y azufre (S) lo es en Africa Occidental, y la toxicidad de aluminio (Al) en América Latina (Sánchez y Salinas, 1981). El mejoramiento de la deficiencia de P mediante la aplicación de fertilizantes fosforados es costosa. Por esta razón, las prácticas mejoradas de manejo tienen la mejor posibilidad de adopción por los pequeños agricultores de subsistencia y de recursos financieros limitados, siempre y cuando aquéllas involucren sólo una pequeña cantidad de insumos de bajo costo. Para alcanzar esto es necesario determinar prácticas eficientes de fertilización en conjunto con el desarrollo de cultivares eficientes en la utilización del P.

En este trabajo se resumirá brevemente la investigación relevante adelantada en el ICRISAT, cerca de Hyderabad en India. Se informa también sobre los resultados de estudios hechos en tres aspectos de la nutrición del P: el suelo, la planta, y los microorganismos asociados, y se discute el futuro del mejoramiento del cultivo bajo condiciones de estrés de P y otras ambientales relacionadas con éstas.

Respuesta del Sorgo a la Fertilización Fosfórica

Debido a la amplia variación en la respuesta a la fertilización con P en los campos de los agricultores reportados en los TSA

* Fisiólogo vegetal, microbiólogo, edafólogo y químico de suelos, respectivamente, International Crops Research Institute for the Semi-Arid Tropics (ICRISAT), Patancheru, India.

de India (Pal et al., 1982), se requiere mucha más información crítica de base para predecir la ocurrencia de la deficiencia de P. Es necesario entender mejor tanto la demanda de nutrimentos de los cultivos como la capacidad de los suelos para suministrar el P. La demanda de P en los cultivares de sorgo con altos rendimientos es alta (Cuadro 1). Para obtener información sobre el suelo y su suficiencia, debemos confiar en los resultados de los experimentos de respuesta a la fertilización, de los cuales ya se ha realizado una gran cantidad en el ICRISAT.

Cuadro 1. Concentraciones minerales^a en el grano y en la paja, y cantidades totales de minerales retirados del suelo por el sorgo, con un nivel de rendimiento de 5 t/ha de grano y 10 t/ha de paja, en la estación lluviosa de 1979 y en un Alfisol ligeramente ácido en ICRISAT.

Elemento mineral	Concentración del elemento		Nutrimento absorbido del suelo (kg)		
	En el grano	En la paja	Por el grano	Por la paja	Total
En meq/g					
N	14.6	8.0	73.0	80.0	153.0
K	5.2	10.3	26.0	103.0	129.0
P	3.7	1.2	18.5	12.0	30.5
Mg	2.2	2.2	11.0	22.0	33.0
Ca	0.3	3.0	1.5	30.0	31.5
S	1.0	0.9	5.0	9.0	14.0
En µg/g					
Al	213	947	1.07	9.47	10.54
Fe	55	269	0.28	2.69	2.97
Mn	21	58	0.11	0.58	0.69
Zn	28	25	0.14	0.25	0.39
Cu	6	8	0.03	0.08	0.11

a. Los datos sobre las concentraciones minerales representan el valor promedio de 12 cultivares sembrados en 4 niveles de fertilidad con una fertilización promedio ligeramente ácido-neutra, de 45 kg/ha de N y 19 kg/ha de P.

FUENTE: Seetharama, N. y Clark, R. B. Sin publicar.

Comparación de Cultivos por su Respuesta a la Fertilización con Fósforo

La mayor parte del sorgo de los trópicos se cultiva intercalado. Para poder predecir la necesidad de fertilizar los sistemas de cultivo basados en el sorgo, debemos saber la respuesta de cada uno de los componentes del sistema a la fertilización con P. Un experimento realizado en materas, de tipo Neubauer, en un Alfisol altamente deficiente en P (más o menos, 1 µg/g de P,

Olsen) mostró claramente la diferencia entre la necesidad de fósforo adicional del sorgo y del guandul. Sin fósforo adicional, el crecimiento del guandul fue satisfactorio durante un período de 40 días pero tanto el crecimiento como la absorción de P del sorgo estuvieron muy limitados (Cuadro 2). Estas diferencias notorias entre sorgo y guandul confirmaron los resultados obtenidos en el campo.

Cuadro 2. Efecto de la adición de fósforo sobre el crecimiento del sorgo y del guandul 40 días después de la emergencia, en un experimento hecho en materas con un Alfisol deficiente en P, en ICRISAT, 1980.

Característica	Sin adición de P	Con Pañadido (20 µ/g)	DMS _{0.05}
Producción de materia seca (g/matera)			
Sorgo	0.9	3.5	0.3
Guandul	2.5	2.2	0.5
Absorción de P (mg/matera)			
Sorgo	0.6	3.7	0.3
Guandul	3.4	4.4	0.7

El experimento se localizó en un Alfisol ligeramente ácido (pH 6.0-6.5) que se describe en la siguiente sección. La aplicación de P soluble en agua ocasionó una respuesta mayor en el sorgo y en el millo que en el guandul. La respuesta de estos cereales excedió el 100% y la aplicación de una cantidad pequeña de P (10 kg/ha) fue suficiente para alcanzar la mayor parte de la respuesta máxima posible (Figura 1). La relación costo-beneficio

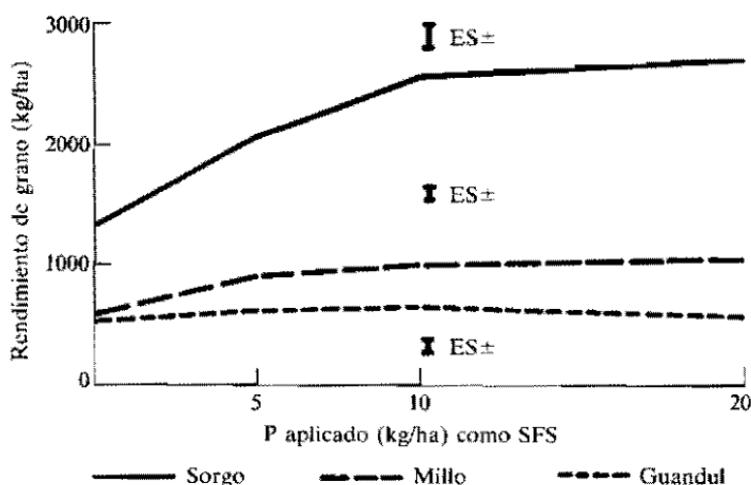


Figura 1. Efecto de la aplicación de fósforo en el rendimiento de grano del sorgo, del millo y del guandul, en ICRISAT, 1976 a 1979.

del primer incremento de P (5 kg/ha) fue muy atractiva. Aún más importante fue la consistencia de la respuesta del sorgo a la aplicación de fósforo adicional en este Alfisol durante varios años, independiente también de la precipitación estacional (Figura 2); en contraste, hubo variabilidad en la respuesta a la aplicación de nitrógeno (Kanwar et al., 1984). En el guandul, la respuesta fue consistentemente baja durante todos los años; este cultivo tiene una demanda pequeña de P y parece ser eficiente en la absorción del fósforo del suelo.

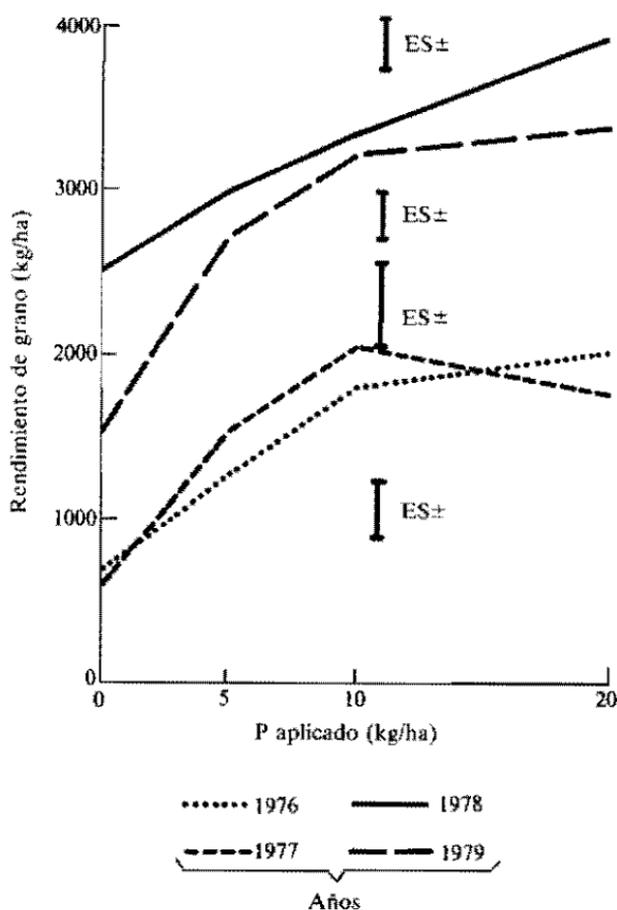


Figura 2. Variación estacional en la respuesta del sorgo al superfosfato simple en ICRISAT.

Efecto de las Fuentes de Fósforo

El estudio de las diferentes fuentes de P requiere experimentos cuidadosamente diseñados debido a que los efectos residuales de una sola aplicación pueden durar varios años. Por esta razón, es necesario diseñar experimentos a largo plazo. En tales experimentos, el monocultivo continuo es indeseable debido a la posibilidad de aumentar los problemas de plagas y enfermedades. Para resolver este problema, se diseñó un sistema de rotación simple de dos años con sistemas de cultivo mejorados consistentes en una alternación de millo y guandul en un año, en rotación con sorgo en monocultivo al año siguiente. La duplicación de los lotes principales, uno por cada sistema de cultivo (millo/guandul, y sorgo) garantizaron que cada cultivo sería examinado cada año, con una aplicación basal de 40 kg/ha de N en todos los tratamientos de millo y 60 kg/ha de N en el sorgo.

Utilizando este diseño general se comenzó un experimento en 1976 en un Alfisol para determinar la extensión en la cual la roca fosfórica podría sustituir las fuentes de fósforo solubles en agua. Una razón principal para estudiar la efectividad de la roca fosfórica fue la escasez de fuentes indígenas de azufre en la India que convirtieran la roca fosfórica en superfosfato soluble.

El sorgo respondió a la aplicación de roca fosfórica pero con menor intensidad que el fósforo soluble en agua (Figura 3). La aplicación de toda la roca fosfórica inicialmente para el período completo de los cuatro años ocasionó una respuesta significativamente mayor que las aplicaciones anuales, pero solamente para la tasa de aplicación más alta. Este experimento continuará todavía durante dos años antes de la finalización de su segundo ciclo de cuatro años. Un muestreo cuidadoso del suelo indicará entonces los cambios ocurridos en el estado nutricional del suelo.

Efecto del Suelo

Los experimentos preliminares en el ICRISAT también indicaron que los Vertisoles y Alfisoles difieren notablemente en su relación de (análisis de suelo) / (respuesta del cultivo) respecto a la aplicación de P al sorgo. En experimentos de campo hechos en las épocas lluviosas de 1981 y 1982, el sorgo respondió favorablemente a la adición de P solamente cuando el fósforo disponible en el Vertisol era extremadamente bajo (menos de 2 $\mu\text{g/g}$

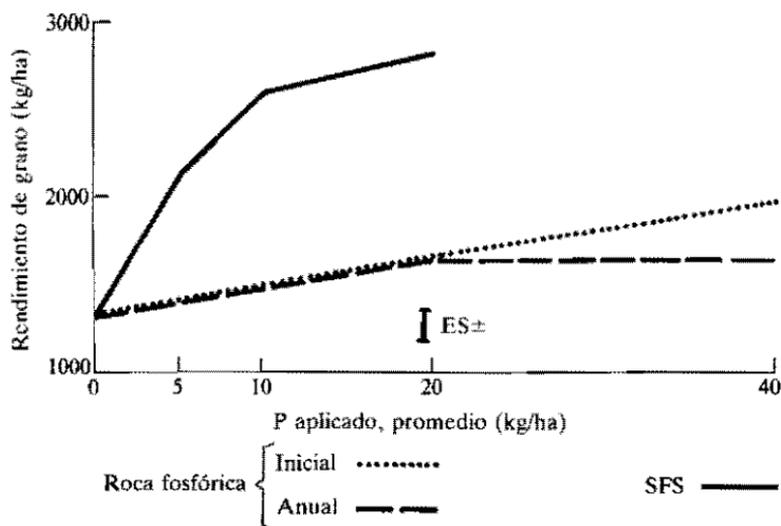


Figura 3. Efecto de la fuente y de la tasa de aplicación del fósforo en el rendimiento de grano del sorgo en ICRISAT, 1976 a 1979.

de P, Olsen). Se observaron respuestas más grandes en el experimento a largo plazo en un Alfisol cercano (descrito anteriormente), con un contenido de fósforo disponible más alto inicialmente ($3 \mu\text{g/g}$). De esta forma, los dos suelos parecen tener límites críticos diferentes. Se intentó hacer una comprobación más rigurosa en experimentos de invernadero utilizando cuatro sitios de muestreo por cada tipo de suelo para ofrecer un rango del estado del fósforo disponible. Las relaciones basadas en la prueba de Olsen difirieron muy poco entre los dos órdenes de suelo, pero cuando se usaron otras pruebas de suelo para determinar el P, se observaron diferencias considerables (Haile, 1983); actualmente, estas investigaciones continúan en el ICRISAT.

Variación en los Genotipos de Sorgo por su Fisiología de la Nutrición con Fósforo

La variación genotípica en la eficiencia nutricional se puede deber a una o más de las características señaladas en el Cuadro 3. Las plantas adaptadas a los suelos de baja fertilidad parecen tener características diferentes a aquellas adaptadas a los suelos con un suplemento nutritivo óptimo (Bielecki y Lauchli, 1983).

Cuadro 3. Componentes posibles de variaciones genéticas que llevarían a eficiencia nutritiva.

-
- I. Por adquisición del ambiente
 1. Sistema de raíces eficiente.
 - a) Relación alta raíces/tallo, en una deficiencia nutricional.
 - b) Dispersión lateral y vertical mayor de las raíces.
 - c) Densidad radicular o superficie de absorción alta, y más pelos radiculares, especialmente bajo estrés.
 2. Eficiencia fisiológica de absorción de nutrimentos por unidad de longitud radicular.
 3. Desarrollo de poder reductor y quelatinizador (Fe, por ejemplo).
 4. 'Ampliación' del sistema radicular por las micorrizas.
 5. Longevidad de las raíces.
 6. Habilidad de las raíces para modificar sus rizosferas y superar niveles, ya sea bajos o ya tóxicos, de elementos minerales.
 - II. Por movimiento de nutrimentos más allá de las raíces hasta entregarlos al xilema
 1. Tránsito lateral a través de la endodermis.
 2. Entrega al xilema.
 3. Control de la distribución de los iones absorbidos, ya sea por el sistema de las raíces o por el follaje, o por ambos.
 - a) Tránsito hacia la raíz o hacia el tallo bajo condiciones de deficiencia.
 - b) Regulación total de la absorción de nutrimentos y de su uso en todos los niveles de la planta.
 - III. Por distribución de nutrimentos dentro de la planta
 1. Capacidad de almacenamiento rápido cuando el nutrimento está disponible, para su uso posterior.
 2. Grado de traslocación y de reutilización bajo estrés.
 3. Liberación de los iones de las vacuolas bajo deficiencia de nutrimentos.
 4. Compuestos naturales formadores de quelatos de hierro en el xilema.
 5. Tasa de abscisión foliar y tasa de hidrólisis (de P orgánico, por ejemplo).
 - IV. Por crecimiento y eficiencia metabólica bajo limitaciones nutricionales
 1. Capacidad de funcionamiento normal, aun en condiciones relativamente bajas de concentración de nutrimentos en los tejidos.
 2. Sustitución de elementos (Na^+ por K^+).
 - V. Por niveles de poliploidía e hibridación
-

FUENTES: Chaplin, 1980; Gerloff y Gabelman, 1983; Goodwin y Wilson, 1976; y Saric, 1983.

Por esta razón, es necesario evaluar la eficiencia nutricional de los genotipos de sorgo bajo condiciones diferentes:

- comportamiento en un suplemento nutritivo de moderado a adecuado; y
- comportamiento cuando los nutrimentos están muy limitados.

Selección por Uso Eficiente del Nitrógeno y del Fósforo Habiendo Suministro Adecuado de Nutrimentos

La respuesta diferencial de los genotipos de sorgo a un mismo nivel de nutrimentos aplicados sugiere la existencia de diferencias genotípicas en la eficiencia de absorción de nutrimentos y en la distribución de éstos en la planta. Hemos observado variación considerable en las diferentes características relacionadas con la absorción y la utilización tanto del nitrógeno como del fósforo (Cuadro 4). Nuestros estudios también mostraron que

Cuadro 4. Rango de variabilidad en la absorción y traslocación de nitrógeno y fósforo en 14 genotipos de sorgo en un Alfisol, en la época que sigue a lluvias, en 1976.

Carácter	Valores del rango			CV (%)
	Máximo	Mínimo	Media	
Rendimiento de grano (g/planta)	54	8	35	30
Peso seco (g/planta)	130	51	79	26
Índice de cosecha, IC (%)	66	12	42	27
N en el grano (g/planta)	1.02	0.16	0.51	33
Contenido de N (g/planta)	1.25	0.51	0.74	23
Índice de traslocación de N, ITN (%) ^a	83	25	69	21
P en el grano (g/planta)	0.60	0.07	0.26	44
Contenido de P (g/planta)	0.65	0.19	0.33	32
Índice de traslocación de P, ITP (%) ^a	93	33	79	20

a. Calculado como el porcentaje que corresponde al grano del total de la relación N/P de la parte aérea de la planta.

la absorción de N y P estaba altamente correlacionada con la producción total de materia seca del cultivo; y que la eficiencia de traslocación (proporción que posee el grano de todo el nutriente presente en la parte aérea de la planta) de estos minerales también estaba altamente correlacionada con el índice de cosecha (Figura 4). Esto sugería dos cosas: que la selección respecto al crecimiento del cultivo puede incluir automáticamente la selección por eficiencia en la absorción de N y P; y que los genotipos con un índice de cosecha razonable podrán también tener una habilidad razonable para transferir estos minerales al grano.

Se establecieron varios experimentos en niveles de fertilidad y tipos de suelo diversos para estudiar las diferencias genotípicas en la absorción y utilización de nutrientes. Encontramos que los genotipos que tenían aproximadamente la misma biomasa y el mismo índice de cosecha podían variar significativamente en su absorción de N y P así como en su transferencia al grano. Tales diferencias están generalmente enmascaradas cuando se analizan en conjunto los datos para el juego completo de genotipos heterogéneos. El Cuadro 5 muestra la variabilidad de tales caracteres en un grupo de cinco genotipos seleccionados que caían dentro de una clase comparable de madurez (excepto IS 6380). Nótese, por ejemplo, que tanto el P 721 y el DL 642 tienen pesos secos similares, pero el P 721 toma un 39% más de nitrógeno que el otro y tiene una habilidad de transferencia de nitrógeno 9% más grande que él. Similarmente, el IS 858 y el DL 642 tienen casi el mismo índice de cosecha (IC) pero el ITP para el IS 858 es 22% mayor que para el DL 642.

Para establecer, si la selección por peso seco y por IC incluía también la selección por absorción de nutrientes y por traslocación al grano, se hicieron cruzamientos entre los padres indicados en el Cuadro 5. Se seleccionaron plantas F_2 respecto a un rango de peso seco por planta y al índice de cosecha, y en las progenies F_3 se hicieron estimados de peso seco y de rendimiento de grano, así como de concentración de N y P en el grano y en toda la planta. Las correlaciones entre biomasa y nutrientes totales absorbidos por los diferentes grupos de las progenies F_3 fueron de nuevo muy altas ($P < 0.01$). Se observaron relaciones similares entre el IC y la eficiencia de transferencia del N y del P.

Así pues, la selección respecto a la biomasa y al IC, bajo condiciones adecuadas de nutrientes, incluye también la selección por características relacionadas con la absorción de los

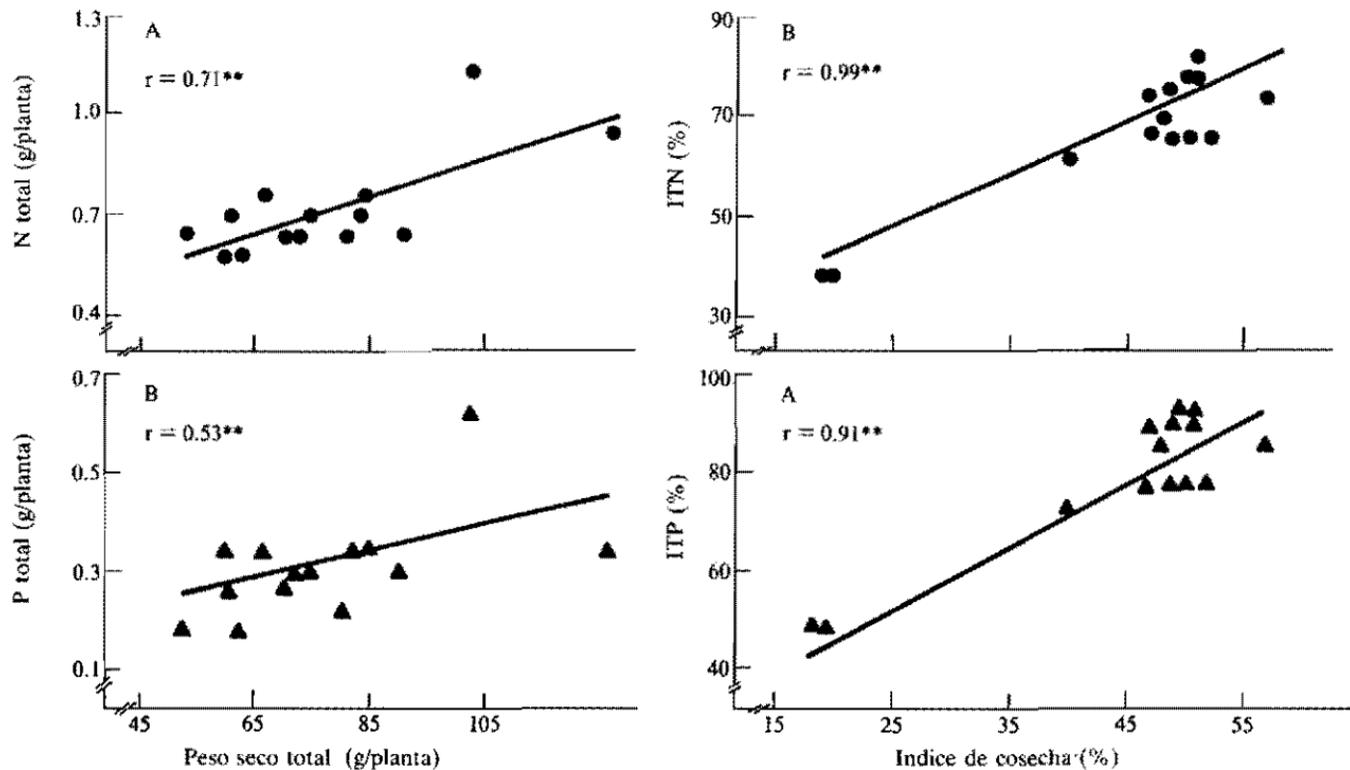


Figura 4. Relaciones entre el peso seco de la planta y el N o el P contenido por planta (A). Relación (B) entre el índice de cosecha y el índice de traslocación de N (ITN), o entre aquél y el índice de traslocación de P (ITP).

Cuadro 5. Absorción y traslocación de nitrógeno y fósforo, y peso seco del grano y de la planta en genotipos seleccionados; promedio de tres ambientes con una fertilización moderada o alta de N y P, en ICRISAT.

Caracteres	Genotipo					Promedio	ES±
	P 721	IS 858	IS 2223	DL 642	IS 6380		
Rendimiento de grano (g/planta)	18.3	27.2	21.8	24.1	5.1	19.3	3.8
Peso seco total (g/planta)	60.6	79.1	53.6	61.5	70.2	65.0	4.4
Indice de cosecha (%)	30.2	34.4	40.7	39.2	7.3	32.0	2.6
N total (g/planta)	0.78	0.77	0.48	0.56	0.67	0.65	0.06
Indice de traslocación de N (%)	44.9	46.8	56.3	42.9	23.9	43.1	4.1
Grano (g)/N tomado por la planta (g)	23.5	35.3	45.4	43.0	7.6	29.7	13.1
Peso seco (g)/N en la planta (g)	77.7	102.7	111.7	109.8	104.8	100.0	14.1
P total (g/planta)	0.19	0.38	0.41	0.43	0.31	0.34	0.05
Indice de traslocación del P (%)	63.2	60.5	41.5	23.3	35.5	44.1	5.8
Grano (g)/P en la planta (g)	96.3	71.6	53.2	56.0	16.5	56.8	12.9
Peso seco (g)/P en la planta (g)	318.9	208.2	130.7	143.0	226.5	191.2	31.4
Días a 50% de la floración	65	67	67	69	82	70	10

nutrimentos (N y P) y de su traslocación al grano. En estados de fertilidad del suelo de moderados a altos, no son necesarios los programas de mejoramiento diseñados específicamente para aumentar la eficiencia en el uso de los nutrimentos principales, ya que las accesiones ineficientes se pueden descartar en el proceso rutinario de pruebas en múltiples localidades, o cuando aquéllas se prueben en diferentes niveles de fertilidad (Rao et al., 1981; Seetharama et al., 1984).¹

Evaluación de Genotipos con Concentraciones Bajas de Fósforo y Sin Fertilizantes

La variabilidad entre los pocos genotipos seleccionados por su eficiencia fisiológica en el uso de nutrimentos se muestra en el Cuadro 5. La cantidad de materia seca producida por unidad de P tomado por la planta varió mucho más que la producción de materia seca por unidad de N. En 1977 se seleccionaron 140 entradas de germoplasma de un vivero de selección para sequía conformado por 1200 accesiones originadas en las regiones más secas de los TSA. Mientras que la mayoría de las líneas mostraron una deficiencia severa de P, las líneas seleccionadas no tuvieron tales síntomas y dieron rendimientos de grano comparativamente más altos. Más tarde se seleccionaron repetidamente en un campo con contenido bajo de P (2 $\mu\text{g/g}$ de P, Olsen), que era un Alfisol con una relación suelo-P disminuida por una siembra repetida de maíz; se comparó allí la habilidad de esas líneas para crecer y producir rendimientos razonables. El Cuadro 6 muestra las variaciones de diferentes características de unas pocas accesiones seleccionadas y de los testigos. Mientras que las diferencias en madurez e índice de cosecha dificultan la medida exacta de la eficiencia, la superioridad de algunos genotipos (por ejemplo, IS 10734 o IS 10747) sobre DL 642 y CSV 5 es clara tanto en el rendimiento de grano como en la absorción de P (Cuadro 6). Entre los cultivares liberados, el híbrido común hindú CSH 6 mostró una eficiencia comparable con el IS 10734 o el IS 10747, indicando que el programa convencional de mejoramiento ha tenido también éxito en la producción de cultivares eficientes en el uso del P.

No se observó ninguna relación entre la concentración de P en las plantas y la productividad ya sea de grano o de biomasa (Figura 5). Para identificar los genotipos eficientes, se necesita

1. Además, Alagarswamy, G. Datos sin publicar sobre el millo en ICRISAT.

Cuadro 6. Diferencias genotípicas en la eficiencia de utilización del P y en la colonización de micorrizas, en un Alfisol con P (Olsen) mayor de 0.5 µg/g; estación lluviosa de 1983, en ICRISAT.

Genotipo de sorgo	Origen	Días a floración	Grano (g/m ²)	Biomasa (g/m ²)	Índice de cosecha, IC (%)	Índice de translocación de P, ITP (%)	Absorción de P (g/planta)	Eficiencia en el uso del P en la planta		Raíces colonizadas por micorrizas (%)	
								Grano (g/g P)	Biomasa (g/g P)	En campo ^a	En materas ^b
Accesiones de germoplasma											
IS 10734	Chad	62	145	507	28.5	73.4	0.41	355	1243	34	57(22)
IS 10747	Chad	67	84	337	24.9	68.7	0.62	134	548	64	34(25)
IS 7501	Nigeria	102	35	1264	3.0	19.3	0.84	42	1531	67	16(8)
IS 1320	Nigeria	99	19	676	3.5	18.6	0.54	39	1202	47	65(33)
IS 3860	Mali	95	23	518	4.2	27.3	0.37	60	1392	34	28(23)
Líneas de mejoramiento											
DL 642	India	80	6	188	2.9	13.4	0.14	43	1358	25	23(10)
CSH 6	India	66	113	531	22.0	73.6	0.58	196	925	43	—(—)
CSV 5	India	84	7	294	2.5	8.3	0.32	21	887	—	—(—)
P 721	E.U.	80	4	110	3.5	11.5	0.12	32	917	—	—(—)
Media de 24 accesiones^c											
ES (±)		2.5	14.8	112	2.3	8.6	0.08	23	166	9	15
CV (%)		4.5	34.4	38	30.2	34.7	28.7	33	23	20	49
Mínimo		61	2.7	110	0.41	1.6	0.12	4	548	25	23
Máximo		104	15.7	1264	28.5	73.6	0.89	355	1531	67	65

a. Muestra tomada en madurez fisiológica.

b. Muestra tomada 40 días después de la siembra. Los datos entre paréntesis representan el porcentaje de la colonización cuando las materas se regaron con soluciones de P de 10 µg/g de solución.

c. Las accesiones estudiadas fueron 24, excepto en el ensayo sobre micorrizas (7 en el campo y 6 en materas).

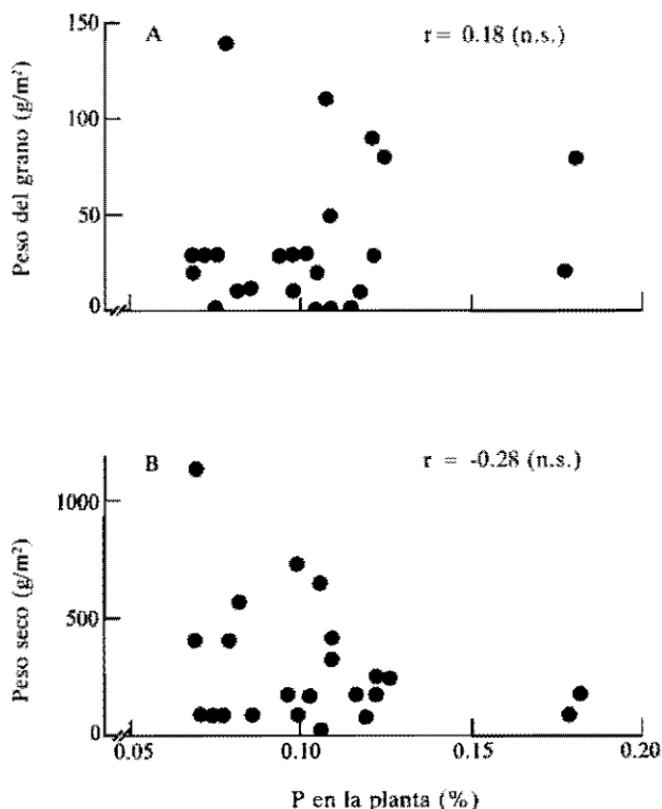


Figura 5. Relaciones entre las concentraciones de P en la planta madura y en el grano (A), o entre aquéllas y el rendimiento de materia seca, en ICRISAT, en la estación lluviosa de 1983 (B).

considerar tanto la absorción alta de P como la eficiencia alta en la utilización de P para la producción de grano y biomasa (Cuadro 6). Sin embargo, los cocientes de utilización pueden variar ampliamente dentro de un mismo genotipo, según la cantidad y el patrón del suplemento nutritivo (Meyers y Asher, 1982; ver también la siguiente sección).

Micorrizas

Diferencia entre genotipos hospedantes

Una revisión de los sorgos cultivados en un Alfisol en ICRISAT mostró una colonización extensa de las raíces por micorrizas

vesículo-arbusculares (VAM). Se encontraron esporas de los cuatro géneros principales de hongos de VAM: *Glomus*, *Gigaspora*, *Acaulospora* y *Sclerocystis*. La extensión de la colonización de las raíces varió según la localización y el cultivar, sugiriendo esto una posible causa para las diferencias en la cantidad de beneficios que el cultivo puede derivar de tal asociación simbiótica bajo diferentes condiciones. La respuesta de la colonización radicular de las micorrizas, el crecimiento de la planta y la absorción de P varían con la cepa del hongo de micorriza usado (Krishna y Diart, 1984). La dependencia de la eficiencia simbiótica tanto de la cepa del hongo como del ambiente edáfico es bien conocida (Abbot y Robson, 1982; Hayman, 1982) pero se entienden muy poco las diferencias entre los genotipos hospedantes.

Estas diferencias en cuanto al porcentaje de colonización radicular se determinaron tanto en el campo como en materas (Cuadro 6) empleando un Alfisol con baja concentración de P (1 $\mu\text{g/g}$ de suelo; extraído con NaHCO_3). La adición de P trajo como consecuencia una disminución en la tasa de colonización, pero los genotipos 'eficientes' como el IS 10734, el IS 10747 y el IS 1320 mostraron una colonización más alta que los hospedantes 'ineficientes' tales como el DL 642. Algunas interacciones entre los niveles de P y los genotipos hospedantes fueron aparentes; todavía no se han investigado las interacciones entre los niveles de P y la eficiencia de las cepas (Howeler y Sieverding, 1983).

Respuesta a la inoculación con hongos de micorrizas

En un ensayo de materas en que se utilizó un Alfisol mezclado con arena (1:1 v/v), la inoculación del híbrido de sorgo CSH 5 con cinco cepas diferentes de hongos micorrizales aumentó el crecimiento entre un 15% y un 20% (Cuadro 7). La habilidad de las diferentes poblaciones de micorrizas para estimular el crecimiento de la planta varió ampliamente. El porcentaje de colonización de micorrizas y el contenido de fósforo inorgánico en el exudado del xilema tuvieron correlación significativa, lo mismo que entre ese porcentaje y el contenido de P en la planta (Figura 6). Esto indica que el P en el exudado del xilema se puede utilizar para seleccionar plantas y cepas de hongos por su efectividad en la simbiosis micorrizal, en términos de la absorción del P por la planta.

Cuadro 7. Influencia de la inoculación con micorrizas en el contenido de materia seca del tallo, en la concentración de fósforo en los tejidos de la planta, y en la extensión de la colonización de las micorrizas.*

Hongos de micorrizas	Materia seca de tallo y follaje (g/planta)	Concentración de P en el tejido (mg/g de materia seca)	Colonización de las raíces por micorrizas (%)
<i>Glomus fasciculatum</i>	1.93	5.1	66
<i>Glomus mosseae</i>	2.20	3.5	52
<i>Gigaspora margarita</i>	2.07	4.9	48
<i>Glomus fasciculatum</i> (E3)	1.43	1.8	40
<i>Gigaspora calospora</i>	1.14	3.1	36
<i>Acaulospora laevis</i>	1.33	2.2	32
Testigo	0.98	1.7	25
ES(±)	0.20	0.2	0.5
CV(%)	21	13	11

a. Plantas de 54 días; todos los valores son promedios de cinco repeticiones (materas), y en cada una crecía una planta en una mezcla (1:1 v/v) de suelo con arena esterilizada al vapor antes de la siembra. Se sembró sorgo híbrido CSH 5.

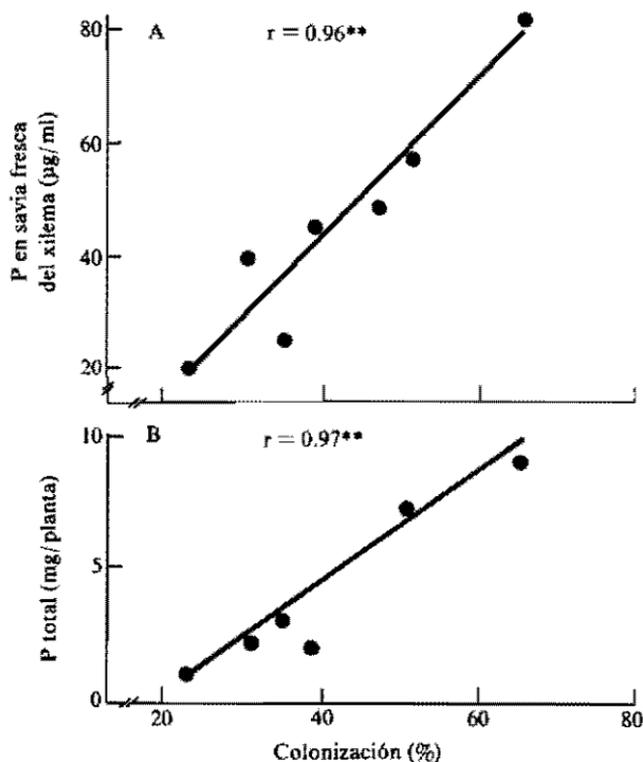


Figura 6. Relaciones entre el porcentaje de colonización de las raíces por hongos de micorrizas de un lado, y de los fosfatos orgánicos y el P en los exudados de savia del xilema (A), del otro; y entre aquel porcentaje y el P total por planta (B). Los experimentos se hicieron en materas, en ICRISAT, 1984; los fosfatos se determinaron por el método del molibdato de vanadio.

Discusión

Nuestra comprensión actual de la naturaleza de la adaptación de los cultivos a los bajos niveles de insumos naturales o añadidos es incompleta. De una parte, algunos tienen expectativas poco razonables de que los cultivos se puedan sembrar continuamente sin la aplicación de fertilizantes; pero, de otra parte, algunos tienen la preocupación de que el uso de genotipos 'eficientes' puede agotar los nutrimentos, ya de por sí limitados, del suelo (Lambert y Arnason, 1982).

Claramente, los problemas del estrés de P no se pueden solucionar fácilmente, pero se pueden reducir a proporciones manejables en muchos aspectos diferentes si se estudian en concierto los factores pedológicos, de enmienda del suelo, de fertilización, de nutrición foliar, ecológicos (cultivo intercalado, por ejemplo), y de mejoramiento (Fox, 1979). La absorción eficiente del P del suelo por las plantas (directamente o a través de micorrizas) ofrece sólo una solución temporal en ausencia de una aportación externa de P al sistema. En el caso del nitrógeno, al menos cuando los rendimientos altos no son importantes, los agricultores con recursos limitados pueden minimizar la aplicación de fertilizante nitrogenado introduciendo leguminosas en su sistema de cultivo. En el caso del P, la fertilización puede, cuando menos, aplazarse, pero su necesidad eventual es inevitable. Por esta razón, nuestro interés debe ser la investigación de combinaciones más específicas de genotipo, suelo, y práctica de fertilidad para poder obtener un retorno neto óptimo (Foy, 1983).

El mejoramiento para solucionar el estrés de P se puede hacer más eficientemente en las áreas objetivo ya definidas, dentro de unos límites más estrechos respecto al estrés teórico máximo y a las condiciones óptimas de cultivo (Buddenhagen, 1983). No se deben fijar niveles extremadamente altos de eficiencia (o de resistencia al estrés) como metas realistas, ya que los diferentes mecanismos involucrados en la adaptación de las plantas al estrés nutricional se equilibran (o compensan) unos con otros. Los fitomejoradores deben ser conscientes de los aspectos específicos locales del ambiente y de la posibilidad de emplear mejores técnicas de manejo, y deben responder a ambos. Por ejemplo, en suelos ácidos con un contenido bajo de P, la acidez del suelo puede ser una ventaja de este modo: que la roca fosfórica más barata sea casi tan eficiente como el fósforo soluble en agua más costoso. Como la deficiencia de P de los cultivos en suelos

ácidos se asocia comúnmente con una variedad de otros estreses (incluyendo sequía o enfermedades), los mejoradores deben seleccionar y caracterizar cuidadosamente sus sitios de prueba.

Debido a que la herencia de las características relacionadas con la nutrición de P en el sorgo es más compleja que la de la resistencia a la toxicidad de aluminio (Clark, 1982), es posible que la selección y el mejoramiento de la primera característica sea más difícil. Un sistema de solución o cultivo nutritivo puede suplementar las evaluaciones de campo mucho más efectivamente cuando se selecciona por la toxicidad causada por minerales (Duncan y otros, 1983), pero su utilidad para seleccionar por absorción de P, especialmente con la utilización de micorrizas, ha sido criticada (Howeler, 1981). Sin embargo, considerando la facilidad con que se puede cuantificar el estrés por nutrimentos, y la posibilidad de crear un estrés uniforme cuando se selecciona, debe ser más fácil mejorar un cultivo por su resistencia al estrés de minerales que por su resistencia a la sequía o a la mayoría de los factores bióticos.

Además de mejorar la absorción del P en suelos deficientes en P o altamente fijadores de P, se cree que las micorrizas ayudan a las plantas a absorber otros nutrimentos, los cuales pueden ser limitativos bajo condiciones de suelos ácidos (Hayman, 1982). Las micorrizas también confieren resistencia a la sequía porque aumentan la absorción de agua, y resistencia a enfermedades, ya sea indirectamente previniendo la predisposición de la planta hospedante a problemas como las pudriciones del tallo (Jordan et al, 1984) o directamente compitiendo con los patógenos presentes en el suelo (Gerdemann, 1975). Las micorrizas pueden también ser muy útiles para superar la interacción negativa entre la eficiencia de absorción de diferentes minerales (Brown et al., 1977), como ocurre entre la absorción del P y la del hierro o del cobre (Timmer y Layden, 1980).

La eficiencia de los hongos de micorrizas para promover la absorción de nutrimentos o agua puede depender de una gran variedad de factores. Los hongos adaptados a un suelo alcalino pueden ser menos efectivos en los suelos ácidos. Es necesario entender los efectos del estrés ambiental (temperatura o saturación de agua) y de las prácticas culturales (aplicación de fungicidas o de cal) en la micorriza de la planta de sorgo. La investigación se ha dirigido en el ICRISAT hacia la selección de líneas de sorgo que muestren tasas de colonización altas bajo un amplio rango de condiciones ambientales (incluyendo niveles

de P en el suelo), y hacia la cuantificación del beneficio aportado por las micorrizas a la planta hospedante cuando se cultiva en suelos con un bajo contenido de P, especialmente en suelos lateríticos.

Es urgente la investigación de diferentes aspectos de la nutrición de P en el sorgo. Se requiere también, por sus aplicaciones prácticas, una mejor definición de la eficiencia de uso de micorrizas y de la eficiencia de la utilización del fósforo absorbido por la planta para su crecimiento y para el rendimiento de grano. Sin embargo, la evaluación agronómica general de los genotipos bajo condiciones ambientales representativas debe preceder a la selección basada en criterios puramente fisiológicos. También son necesarios la evaluación y el mejoramiento de las metodologías, para caracterizar los límites críticos de los nutrimentos en diferentes tipos de suelo. El papel de la colonización de micorrizas para determinar los niveles críticos de P en el suelo también se debe investigar. Antes de empezar cualquier esfuerzo de mejoramiento en gran escala que aumente la eficiencia en la utilización de los nutrimentos, es necesario estudiar las concentraciones críticas en el tejido de los genotipos de sorgo, así como la posible interacción con otros factores que afectan el crecimiento del cultivo (Myers y Asher, 1982) y su sanidad. En Australia se está llevando a cabo actualmente un trabajo de características similares sobre concentraciones críticas.²

Como se observa en el Cuadro 6, los sorgos recogidos en Africa Occidental parecen ser más eficientes en la absorción y utilización de P; por ello, se espera encontrar genotipos que hayan desarrollado una mejor eficiencia nutricional en los cultivos locales de los suelos más infértiles, por ejemplo las regiones de Alfisoles lixiviados de Africa Occidental.³ Es recomendable seleccionar mayor cantidad de germoplasma de sorgo en Africa Occidental subsahariana, especialmente en las áreas de pluviosidad media a alta, y en regiones similares de Tanzania, de Tailandia, y de las áreas montañosas de la India Oriental.

Resumen

La deficiencia de fósforo (P) es muy común en los trópicos. Debido a que la necesidad de adicionar P depende de las características tanto del cultivo como del suelo, se han adelantado

2. Asher, C. J. y Edwards, D. G., Universidad de Queensland, Australia. Comunicación personal.

3. Buol, S. W., North Carolina State University, E.U. Comunicación personal.

estudios sistemáticos en los ensayos hechos en el ICRISAT, en India. El sorgo y el millo tuvieron una respuesta considerable cuando se sembraron en un Alfisol y se les añadió P como fertilizante; la respuesta del guandul, en cambio, fue débil. Se necesitaron únicamente 10 kg/ha de P para obtener un gran porcentaje de la respuesta máxima posible; la roca fosfórica fue mucho menos efectiva que el fósforo soluble en agua, ya que el suelo era solo ligeramente ácido. Se han obtenido indicaciones de que los Vertisoles difieren de los Alfisoles en su relación (análisis del suelo)/(respuesta del cultivo) cuando hay aplicaciones de P al sorgo.

Donde la fertilidad es adecuada, o aproximadamente adecuada, no es necesario ningún programa especial de mejoramiento para aumentar la eficiencia en la absorción o utilización del fósforo; el comportamiento de la planta da un índice adecuado de su eficiencia en el uso del P. Sin embargo, puesto que hay más variación genotípica significativa en la eficiencia de la absorción y utilización del P cuando su suministro es bajo que cuando es moderado, es útil continuar con el mejoramiento de cultivares capaces de sobrevivir en suelos con un contenido bajo de P.

Los genotipos adaptados a las condiciones de bajo contenido de P mostraron un mayor grado de colonización de la raíces por hongos de micorriza. La respuesta a la inoculación con diferentes cepas de hongos micorrizales aumentó el contenido de materia seca y de P en las plantas de sorgo en más de dos veces. La estimación del contenido de P inorgánico en exudados de savia del xilema puede ser una prueba rápida para medir la tasa de colonización. La importancia de los hallazgos anteriores para el mejoramiento del sorgo cultivado en suelos con bajo contenido de P aún se discute.

Referencias

- Abbott, L. K. y Robson, A. D. 1982. The role of vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi in agriculture and the selections of fungi for inoculation. *Aust. J. Agric. Res.* 33:389-408.
- Bielecki, R. L. y Lauchli, A. 1983. Synthesis and outlook. En: Lauchli, A. y Bielecki, R. L. (eds.). *Encyclopedia of plant physiology*, New series, v. 15B. Springer-Verlag, Berlín. p. 745-755.

- Brown, J. C.; Clark, R. B. y Jones, W. E. 1977. Efficient and inefficient use of phosphorus by sorghum. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 41:747-750.
- Buddenhagen, I. W. 1983. Breeding strategies for stress and disease resistance in developing countries. *Ann. Rev. Phytopathol.* 21:385-409.
- Chaplin, F. S. 1980. The mineral nutrition of wild plants. *Ann. Rev. Ecol. Syst.* 11:223-260.
- Clark, R. B. 1982. Mineral nutritional factors reducing sorghum yields: Micronutrients and acidity. En: ICRISAT (International Crops Research Institute for the Semi-Arid Tropics). *Sorghum in the eighties: Proceedings of the International Symposium on Sorghum*, ICRISAT, 1981. Patancheru, A.P., India. p. 179-190.
- Duncan, R. R.; Clark, R. B. y Furlani, P. R. 1983. Laboratory and field evaluations of sorghum for response to aluminum and acid soil. *Agron. J.* 75:1023-1026.
- Fox, R. L. 1979. Comparative responses of field grown crops to phosphate concentrations in soil solutions. En: Mussell, H. y Staples, R. (eds.). *Stress physiology in crop plants*. Wiley and Sons, Nueva York, NY, E.U. p. 81-106.
- Foy, C. D. 1983. Plant adaptation to mineral stress in problem soils. *Iowa State J. Res.* 57:339-354.
- Gerdemann, J. W. 1975. Vesicular-arbuscular mycorrhizae. En: Torrey, J. G. y Clarkson, D. T. (eds.). *The development and function of roots*. Academic Press, Londres, Inglaterra. p. 575-591.
- Gerloff, G. C. y Gabelman, W. H. 1983. Genetic basis of inorganic plant nutrition. En: Lauchli, A. y Bielecki, R. L. (eds.). *Encyclopedia of plant physiology*, New series, v. 15B. Springer-Verlag, Berlín. p. 453-480.
- Goodwin, D. C. y Wilson, E. J. 1976. Prospects for selecting plants with increased P efficiency. En: Blair, G. L. (ed.). *Prospects for improving efficiency of phosphorus utilization*. Memorias de un simposio celebrado en la Universidad de New England, 1976. Armidale, S.S.W., Australia. p. 131-139.
- Haile, M. 1983. Comparison of soil test/plant response relationship for phosphorus applied to sorghum on Vertisols and Alfisols at International Crops Research Institute for the Semi-Arid Tropics (ICRISAT). Tesis (M.S.). Addis Ababa University, Addis Ababa, Etiopía.
- Hayman, D. S. 1982. Practical aspects of vesicular-arbuscular mycorrhizae. En: Subbarao, N. S. (ed.). *Advances in agricultural microbiology*. Oxford and IBH Publishing Company, Nueva Delhi, India. p. 325-373.

- Howeler, R. H. 1981. The effect of mycorrhizal inoculation on the phosphorus nutrition of cassava (*Manihot esculenta* Crantz). En: Russell, R. S.; Igue, K. y Mehta, Y. R. (eds.). The soil/root system in relation to Brazilian agriculture. Fundação Instituto Agrônômico do Paraná. Londrina, Paraná, Brasil. p. 243-258.
- y Sieverding, E. 1983. Potential and limitations of mycorrhizal inoculation illustrated by experiments with field-grown cassava. *Plant Soil* 75:245-261.
- Jordan, W. R.; Clark, R. B. y Seetharama, N. 1984. The role of adaphic factors in disease development. En: ICRISAT (International Crops Research Institute for the Semi-Arid Tropics). Sorghum root and stalk rots: a world review. The Rockefeller Foundation, Bellagio Study and Conference Center, Bellagio, Italia. p. 87-97.
- Kanwar, J. S.; Rego, T. J. y Seetharama, N. 1984. Fertilizer and water-use efficiency in pearl millet and sorghum in Vertisols and Alfisols of Semi-arid India. *Fertilizer News* 29(4):42-52.
- Krishna, K. R. y Diart, P. J. 1984. Effect of mycorrhizal inoculation and soluble phosphorus fertilizer on growth and phosphorus uptake of pearl millet. *Plant Soil* 81:247-256.
- Lambert, J. D. H. y Arnason, D. T. 1982. Nitrogen distribution in hybrids and local corn varieties and its possible relationship to a declining soil nitrogen pool under shifting agriculture at Indian Church, Belize. *Plant Sci* 67:119-127.
- Myers, R. J. K. y Asher, C. J. 1982. Mineral nutrition of grain sorghum: Macronutrients. En: ICRISAT (International Crops Research Institute for the Semi-Arid Tropics). Sorghum in the eighties: Memorias del Simposio Internacional de Sorgo, ICRISAT, 1981. Patancheru, A.P., India. p. 161-177.
- Pal, U. R.; Upadhyay, U. C.; Singh, S. P. y Umrani, N. K. 1982. Mineral nutrition and fertilizer response of grain sorghum in India; a review over the last 25 years. *Fert. Res.* 3:141-159.
- Rao, K.; Rao, S. S. y Rao, N. G. P. 1981. Genotype x input management interactions on sorghum. *Indian J. Genet. Plant Breed.* 41:54-58.
- Sallanpaa, M. 1982. Micronutrients and the nutrient status of soils: a global study. *FAO Soils Bull.* 48. FAO, Roma, Italia. p. 444.
- Sánchez, P. A. y Salinas, J. G. 1981. Low-input technology for managing Oxisols and Ultisols in tropical America. *Adv. Agron.* 34:279-406.
- Saric, M. R. 1983. Theoretical and practical approaches to the genetic specificity of mineral nutrition of plants. En: Saric, M. R. y Loughman, B. C. (eds.). Genetic aspects of mineral nutrition. Martinus Nijhoff/Dr. J. Junk Publishers, The Hague, Holanda p. 1-14

Seetharama, N.; Nath, B. y Verma, P. K. 1984. Selection for grain yields in low nitrogen fertility conditions. *Cereal Res. Comm.* 12(1-2):47-52.

Timmer, L. W. y Layden, R. F. 1980. The relationship of mycorrhizal infection to phosphorus induced copper deficiency in sour orange seedlings. *New Phytol.* 85:15-23.

Evaluación de Elementos Minerales en el Sorgo Cultivado en Suelos Ácidos Tropicales

R. B. Clark y L. M. Gourley*

Introducción

Debido a su tolerancia a la sequía y a muchos otros estados de estrés, y a su requerimiento relativamente bajo de fertilizantes, la producción de sorgo se ha incrementado en todo el mundo, incluyendo aquí a América Latina. Una limitante fuerte de la producción del sorgo [*Sorghum bicolor* (L.) Moench] y de otros cultivos en América Latina han sido los elementos minerales asociados con los suelos ácidos. Debido a las masas considerables de tierra de América del Sur que son ácidas (Figura 1), ocurren muchos problemas relacionados con deficiencias y toxicidades de minerales que afectan las plantas cultivadas en los suelos de este continente. La mayoría de los problemas de elementos minerales inherentes a estos suelos se pueden describir señalando los efectos del pH sobre la disponibilidad de los elementos minerales esenciales para el crecimiento de las plantas (Figura 2). Por esta razón, se pueden predecir deficiencias de calcio (Ca), fósforo (P), magnesio (Mg) y molibdeno (Mo), y toxicidades de aluminio (Al), manganeso (Mn) y hierro (Fe) en las plantas cultivadas en suelos ácidos. Sánchez y Salinas (1981) discuten la extensión de los problemas de toxicidad y de deficiencia de minerales en los suelos tropicales ácidos e infértiles de América Latina.

Un método factible para estimular la producción de sorgo y de otros cultivos en los suelos ácidos es desarrollar plantas que toleren mejor el estrés de deficiencia o de toxicidad asociado con estos suelos. Para hacerlo, se requiere identificar y evaluar

* Respectivamente: agrónomo, Servicio de Investigación Agrícola, Departamento de Agronomía, Universidad de Nebraska, Lincoln, NE, E.U., y agrónomo, Departamento de Agronomía, Universidad del Estado de Mississippi, Mississippi State, E.U. El segundo fue líder de los proyectos de INTSORMIL establecidos en el CIAT.

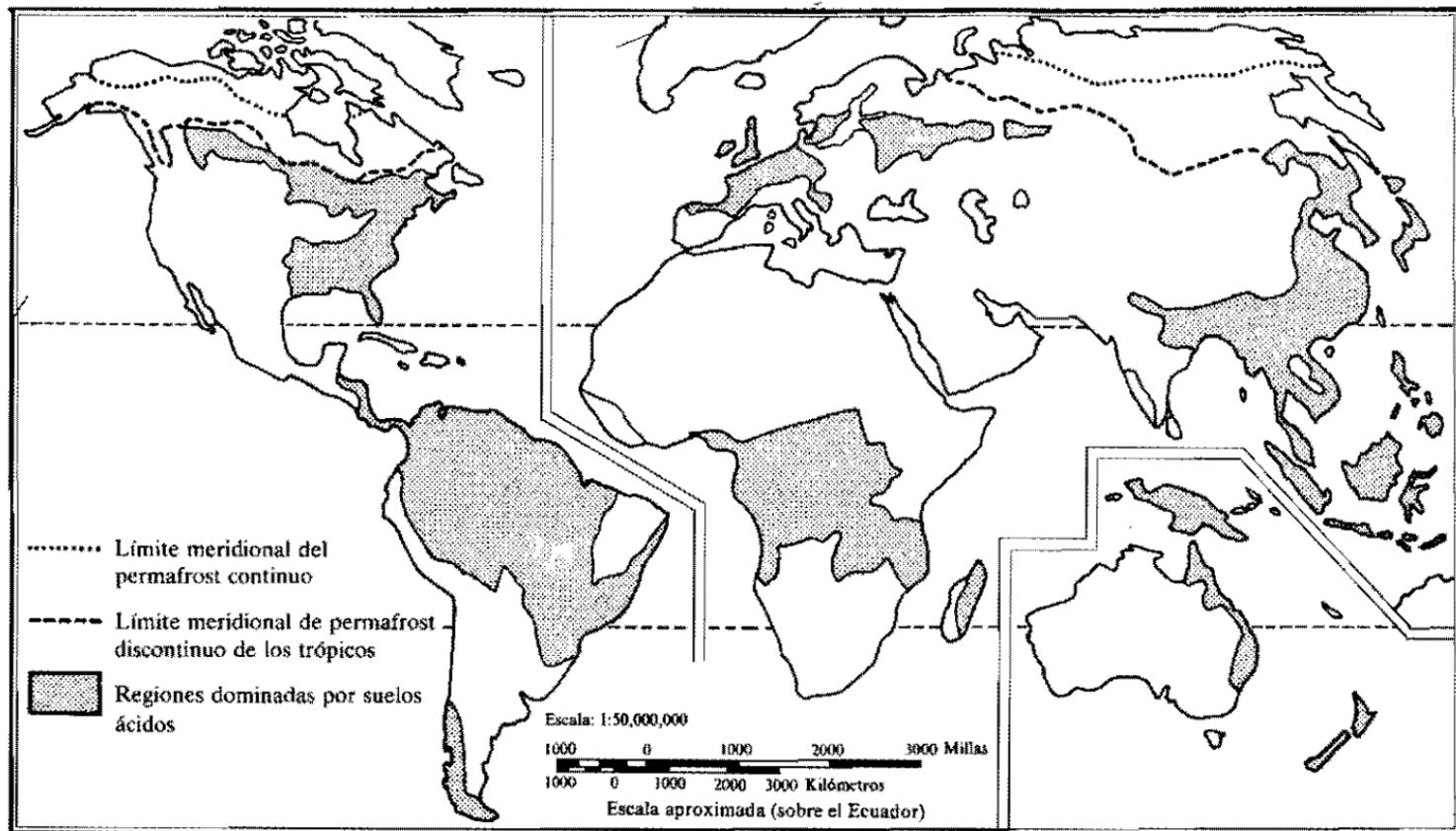


Figura 1. Distribución de suelos ácidos en climas más calientes que el crítico (o sea, donde la temperatura del suelo es, en el año, mayor de 8°C).

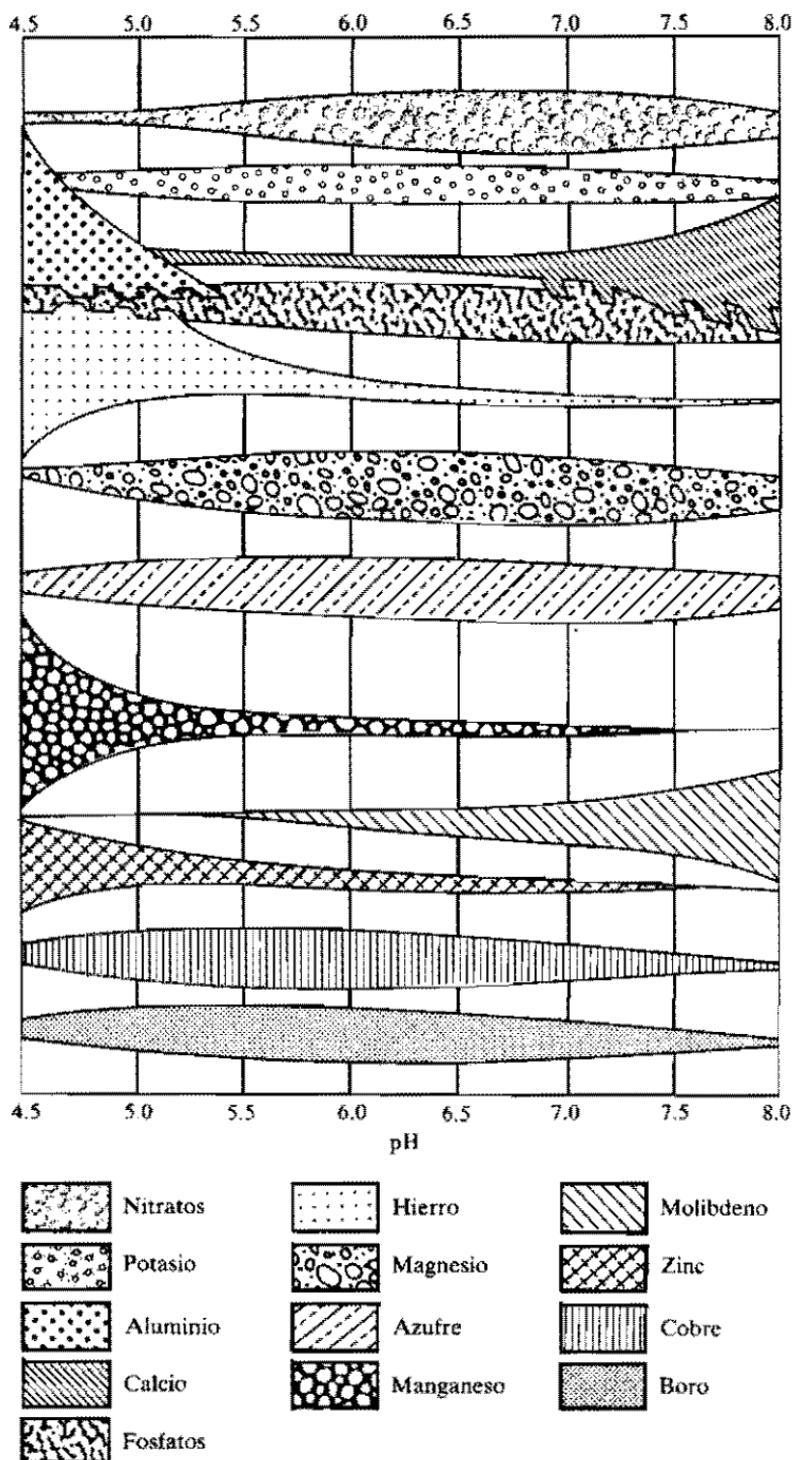


Figura 2. Efecto del pH en la disponibilidad de los elementos minerales en los suelos.

las diferencias que hay entre los genotipos para absorber y usar los elementos minerales necesarios.

Los objetivos de este estudio fueron: 1) describir la metodología utilizada para determinar la presencia de elementos minerales en el tejido de las plantas; 2) determinar la concentración y el contenido de los elementos minerales presentes en plantas de sorgo cultivadas en los suelos ácidos tropicales de Colombia, América del Sur; y 3) observar las diferencias entre los genotipos y evaluarlos de acuerdo con la concentración y contenido de los elementos minerales.

Determinación de los Elementos Minerales en el Tejido de las Plantas

Muchos métodos se usan para determinar la presencia de elementos minerales en muestras de plantas, en el agua y en el suelo. No se discuten aquí las diferentes técnicas disponibles y sus características deseables o indeseables. A continuación se presenta un método que se ha incorporado y usado exitosamente en la Universidad de Nebraska en Lincoln (UNL) para el análisis de elementos minerales en material vegetal.

Knudsen y otros (1981) describieron los detalles del método empleado, la preparación de las muestras y algunos de sus factores limitativos. Esta técnica consiste esencialmente en comprimir gránulos ('pellets') a partir de material vegetal seco y molido (Figura 3, arriba a la izquierda), los cuales se colocan en una bandeja que a su vez se coloca en la cámara de instrumentos (Figura 3, arriba derecha); luego se crea vacío en la cámara, se responden cuatro preguntas en un terminal de microcomputador (Figura 3, centro; Cuadro 1), y se esperan los resultados (Figura 3, abajo; Cuadro 1). Utilizando el programa actual, se puede analizar una bandeja de 40 muestras en aproximadamente 2.5 horas, es decir, 3.5 minutos por muestra. Con el programa general se pueden determinar, para cada muestra, las concentraciones de Ca, P, Mg, Mo, Al, Mn, Fe, Si, S, Cl, K, Cu, y Zn. Se han desarrollado programas adicionales para analizar elementos diferentes de los ya mencionados. El instrumento es capaz de analizar elementos más allá del número 11 en la tabla periódica (el Na), o sea, con un peso molecular mayor de 23. El sodio se puede analizar si está presente en el tejido en concentración de unos 0.5 mg/g. Los únicos elementos minerales requeridos

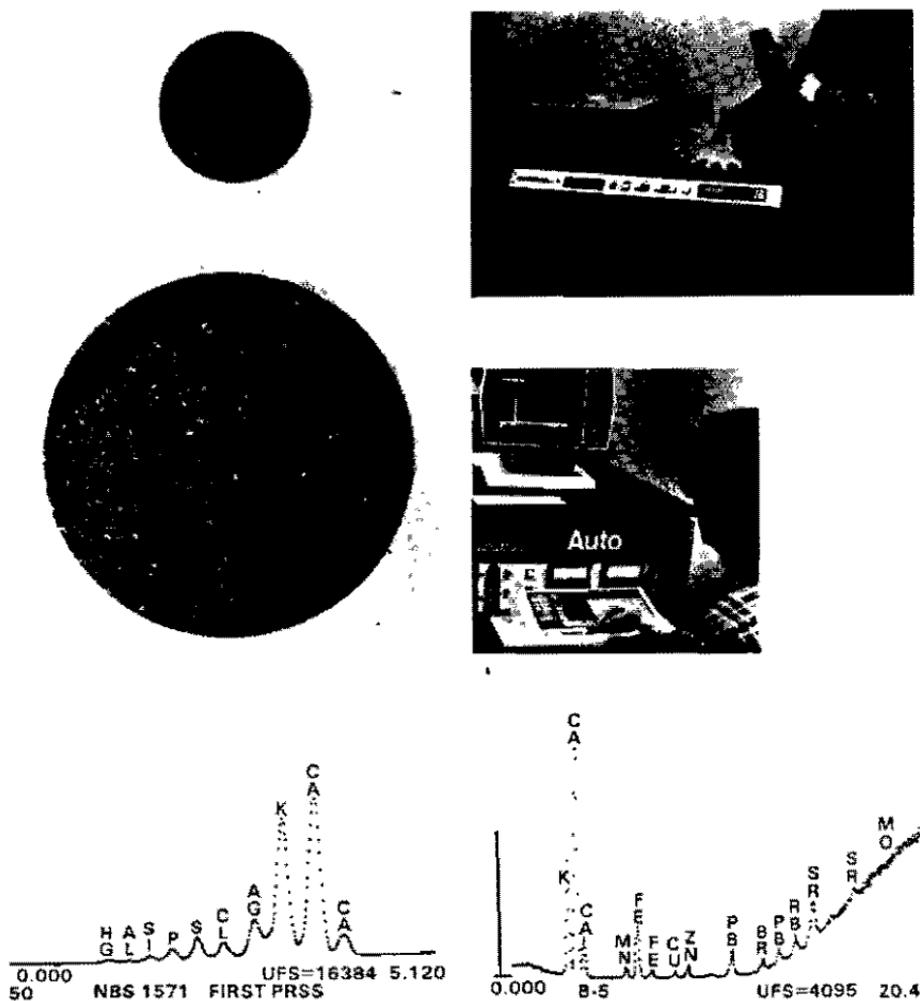


Figura 3. Análisis de dispersión de energía por fluorescencia de rayos X (EDXRF) de muestras vegetales. Comprimidos esféricos pequeños y grandes (arriba, izquierda); posición de las muestras en la cámara del instrumento (arriba, derecha); pantalla, instrumento electrónico de rayos-X, y tablero de instrumentos (al centro); picos de la gráfica del análisis por EDXRF de elementos minerales (abajo).

el sorgo es menor de 1.0 $\mu\text{g/g}$, y a esta concentración el molibdeno es difícil de analizar en la mayoría de los métodos. Los límites inferiores de detección para muchos elementos minerales, utilizando un tubo de plata para rayos X, se dan en el Cuadro 2.

Cuadro 2. Límite inferior de detección (LID) para los elementos minerales analizados en materiales vegetales por el método EDXRF.

Elemento	LID ^a ($\mu\text{g/g}$)	Elemento	LID ^a ($\mu\text{g/g}$)
Na	170		
Mg	135	Cd	9.0
K	40	Cr	2.3
Al	32	Co	2.0
Ca	30	Rb	2.0
Si	28	Sr	1.5
P	25		
S	19	Ni	1.2
Cl	9.3	Pb	1.2
Mn	1.9	Hg	1.0
Fe	1.4	As	1.0
Cu	1.1	Br	0.8
Zn	1.0	Ba	0.5
Mo	1.0	Se	0.5

a. Para valores cuantitativos confiables, las concentraciones del elemento deben ser, por lo menos, tres veces más grandes que los valores del LID.

Este procedimiento ha beneficiado enormemente nuestro programa de investigación. Podemos hacer análisis de elementos con 50 ó 100 mg de tejido vegetal (de preferencia 100 mg) lo cual no es usual para muchas otras técnicas de análisis de multielementos. Esto nos permite analizar elementos minerales en pequeñas cantidades de tejido como plántulas individuales, partes específicas de una planta, o segmentos de las partes de una planta. Disminuye así el tamaño de las muestras que se debe enviar a largas distancias, especialmente a países extranjeros. La muestra no se destruye en el procedimiento del análisis, y por ello las dudas que suscite la concentración de un elemento en una muestra particular pueden resolverse realizándola, o sea, sin necesidad de hacer nuevos comprimidos o de perder la muestra porque haya sido inyectada como líquido en el instrumento. Tampoco es necesario un pesaje exacto de las muestras para hacer los comprimidos; los pesos pueden variar en un 25% con respecto a 100 mg sin causar error. No se necesitan otros procedimientos lentos y tediosos tales como la digestión, la cremación,

la dilución, la resuspensión y disolución en ácidos, o la decantación. También se reduce el uso de vasos y reactivos especiales. El costo de personal especialmente capacitado y del tiempo necesario para el análisis también se ha reducido. Este método permite hacer el análisis de la gran cantidad de material vegetal que se debe evaluar en un programa de mejoramiento, a un costo que es usualmente mayor en la mayoría de los otros procedimientos.

La principal desventaja del método EDXRF es que muy pocos laboratorios lo usan, de manera que no se han desarrollado o no están disponibles las ayudas normales, los programas y las reparaciones requeridas para su uso rutinario. Se ha tenido que desarrollar en este laboratorio un sistema propio de análisis sin el beneficio de la experiencia externa.

Se ha realizado el análisis de elementos minerales de tejido vegetal para el programa cooperativo de investigación de INTSORMIL, cuando estos análisis eran requeridos o deseados. Estos análisis han aumentado nuestra capacidad de investigación, y nos han proporcionado información útil que, de otra forma, no estaría disponible. Se ha facilitado la interacción de los fisiólogos y de los mejoradores, y la razón por la cual las plantas individuales o los genotipos son más tolerantes a las condiciones de estrés por elementos minerales se están entendiendo, definiendo y reconociendo mejor.

Variabilidad de los Elementos Minerales en los Genotipos de Sorgo Cultivados en Suelos Acidos Tropicales

Durante la permanencia de L.M. Gourley en el Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), en Cali, Colombia, se realizó el análisis de los elementos minerales de los genotipos de sorgo cultivados en los suelos colombianos. Esto se hizo para entender mejor las diferencias entre los genotipos en cuanto a la absorción y acumulación de esos elementos en las plantas cultivadas en suelos ácidos o infértiles de los trópicos, y para relacionar la presencia de esos elementos minerales con la tolerancia de las plantas a estos suelos ácidos. Se hicieron experimentos en los cuales se sembraron en un invernadero, en suelos tanto de Carimagua como de Palmira, 60 genotipos de sorgo

(experimento 1), y se cultivaron en el campo 50 genotipos de sorgo en un suelo de Carimagua con aplicaciones de cal de 2 y 6 t/ha (experimento 2). En el Cuadro 3 hay una relación de algunas de las propiedades químicas de estos suelos.

Materiales y Métodos

Experimento 1

Se llenaron materas de plástico (16 cm de diámetro x 18 cm de profundidad) con 2 kg de suelo (cada una) que se había fertilizado con P y K (45 y 42 kg/ha, respectivamente). Se añadieron micronutrientes y urea a las materas en forma líquida a una tasa, en kg/ha, de 15 de N, 1.8 de B, 1.8 de Cu, 1.6 de Zn y 0.3 de Mo. Se suministraron dos tratamientos líquidos adicionales de nitrógeno semanalmente a una tasa de 15 kg/ha de N. Se sembraron las semillas y se regaron los potes con agua destilada según se necesitaba. Este experimento se manejó durante los meses de noviembre y diciembre de 1982 en un invernadero del CIAT. La duración del día fue de 13 horas y las temperaturas ambientales de 20 ± 2 °C durante el día, y de 17 ± 2 °C durante la noche. Las materas se dispusieron en un diseño de bloques completos al azar con tres repeticiones.

En cada matera se sembraron más o menos 20 semillas de cada genotipo de sorgo (Cuadro 4); TX 415 se duplicó: cuando las plántulas tenían dos hojas, se ralearon para dejar 10 por matera. Las plantas tenían 21 días (a partir de la siembra) y de 5 a 6 hojas cuando se terminó el experimento. En este punto se evaluaron visualmente las plantas para buscar anomalías de crecimiento y síntomas inusuales en las hojas. Luego se cortaron a medio centímetro por encima de la superficie del suelo; el tallo se lavó con agua destilada, se secó bien, y las plantas de cada matera se mezclaron para obtener una muestra individual. Las raíces de las plantas de cada matera se lavaron para quitarles el suelo, y se anotaron las anomalías visibles en ellas. Las raíces y las hojas se secaron en un horno de aire forzado durante una semana a 60 °C y después se pesaron. Se descartaron las raíces (el suelo las contaminaba), y las hojas se molieron hasta obtener partículas de un tamaño menor de 0.5 mm (malla 40) y las muestras se enviaron a la UNL para el análisis de los elementos minerales.

Cuadro 3. Propiedades químicas de los suelos (encalados y sin encalar) en los cuales se sembró el sorgo en Carimagua (Llanos Orientales) y en Palmira, Colombia.

Variable o elemento	En Carimagua ^a					En Palmira ^a
	Sin cal	Con 2 t/ha de cal		Con 6 t/ha de cal		
		0-40 cm	0-20 cm	20-40 cm	0-20 cm	
pH	4.3	4.5	4.6	4.8	4.9	7.0
Materia orgánica (mg/g)	38	37	25	38	14	14
P, Bray II (µg/g)	2.8	7.7	1.7	6.4	78.0	78.0
Al (meq/100 g)	3.2	2.9	2.8	1.6	2.1	ND ^b
Ca (meq/100 g)	0.4	1.2	0.6	2.4	1.0	10.3
Mg (meq/100 g)	0.16	0.31	0.12	0.42	0.13	5.2
K (meq/100 g)	0.12	0.25	0.12	0.22	0.10	1.00
ClC (meq/100 g)	3.83	4.65	3.65	4.64	0.75	0.75
Sat. Al (%)	82	61	76	35	62	-

a. El intervalo en cm es la profundidad del suelo a la cual se hicieron los análisis.

b. ND = no se detectó Al en este suelo.

Cuadro 4. Nombre y origen de la semilla de los genotipos de sorgo cultivados en los suelos de Carimagua y Palmira, Colombia, en dos experimentos: de campo y de invernadero.

Pedigrí	Origen de la semilla	Pedigrí	Origen de la semilla
CMSXS 154	Brasil	MN 1706	Mississippi, E.U.
3DX571/1/910	Brasil	MN 1708	Mississippi, E.U.
5DX61/1/6/2	Brasil	MN 1735	Mississippi, E.U.
ICA Nataima	Colombia	MN 1811	Mississippi, E.U.
ISR-1	Texas, E.U.	MN 1912	Mississippi, E.U.
IS 1207C	Texas, E.U.	MN 1958	Mississippi, E.U.
IS 3625C	Texas, E.U.	MN 1959	Mississippi, E.U.
IS 5887C	Texas, E.U.	MN 2877	Mississippi, E.U.
IS 6845C	Texas, E.U.	MN 4508	Mississippi, E.U.
IS 6964C	Texas, E.U.	MN 4581	Mississippi, E.U.
IS 7173C	Texas, E.U.	NB 9040	Nebraska, E.U.
IS 7254C	Texas, E.U.	NSA 935	Texas, E.U.
IS 7273C	Texas, E.U.	156-P-5	Brasil
IS 6841C	Texas, E.U.	156-P-5-2-1	Brasil
IS 7542C	Texas, E.U.	IS 12564C	Brasil
IS 7786C	Texas, E.U.	IS 12610C	Brasil
IS 7909C	Texas, E.U.	IS 12661C	Brasil
IS 7994C	Texas, E.U.	IS 12666C	Brasil
IS 22539C	Texas, E.U.	IS 7419C	Brasil
IS 23564C	Texas, E.U.	IS 7173C	Brasil
IS 12610C	Texas, E.U.	IS 1309C	Brasil
IS 12612C	Texas, E.U.	IS 1335C bajo	Brasil
IS 12685C	Texas, E.U.	IS 1335C alto	Brasil
MN 712	Mississippi, E.U.	IS 3625C	Brasil
MN 1204	Mississippi, E.U.	IS 7254C	Brasil
MN 1388	Mississippi, E.U.	IS 8337C	Brasil
MN 1391	Mississippi, E.U.	TX 415	Texas, E.U.
MN 1533	Mississippi, E.U.	(IS 12610C der)	Texas, E.U.
MN 1557	Mississippi, E.U.	Wheatland	Texas, E.U.
MN 1705	Mississippi, E.U.		

Experimento 2

A principios de abril de 1983, se sembraron semillas de 50 genotipos de sorgo (Cuadro 4) en un suelo ácido de Carimagua, en los Llanos Orientales de Colombia, con aplicaciones de cal de 2 y 6 t/ha de cal dolomítica. Otros fertilizantes añadidos fueron, en kg/ha, 75 de N, 40 de P y 80 de K; el P y el K se añadieron antes de la siembra y el N fue aplicado en bandas cuando las plantas tenían de 5 a 7 hojas. El suelo del ensayo había recibido durante el año anterior, en kg/ha, 1.6 de Zn, 1.89 de B, 1.8 de

Cu, y 0.3 de Mo. El diseño del experimento fue de bloques completos al azar con tres repeticiones. Cuando las plantas tenían de 3 a 4 hojas, se redujo la población a 200,000 planta/ha. Las malezas se controlaron a mano durante el experimento. Las plantas se cultivaron bajo condiciones de secano, aunque se recibió suficiente humedad (100 cm más o menos) durante este tiempo, de manera que el agua no fue una limitante de las condiciones normales de crecimiento. Cuando las plantas alcanzaron 25 días (en la etapa de 'embuchamiento' e iniciación floral) se hizo una calificación visual para medir el comportamiento como tolerancia general a las condiciones de suelo ácido. Los genotipos TX 415 e IS 7173 C se usaron como estándares para calificar las plantas (TX 415 es muy susceptible e IS 7173 C es moderadamente tolerante a la toxicidad del aluminio). Se recogieron por lo menos 4 hojas al azar (la segunda hoja a partir del ápice) de las plantas dentro de cada repetición. Cada muestra se secó a 60 °C durante un día antes de transferirla al CIAT, donde todas se secaron a 60 °C durante una semana. Las muestras se molieron luego hasta obtener partículas de un tamaño menor de 0.5 mm y se enviaron a la UNL para el análisis de minerales.

En esa universidad, las muestras foliares se pusieron en un horno de aire forzado (70 °C) por lo menos durante un día para retirar la humedad antes de obtener los comprimidos ('pellets'). Las muestras de 100 mg (o el peso disponible, si era menor de 100 mg) se comprimieron en bolitas de 13 mm de diámetro, y se analizó en ellas la presencia de P, K, Ca, Mg, S, Cl, Si, Mn, Cu, Zn, y Al aplicando la técnica del EDXRF según el procedimiento de Knudsen et al. (1981).

Resultados y Discusión

Experimento 1

Las plantas sembradas en el suelo de Palmira no mostraron síntomas de deficiencia o de toxicidad de elementos minerales en sus hojas, y las plantas parecían crecer normalmente. Sin embargo, las plantas cultivadas en el suelo de Carimagua eran relativamente pequeñas, muchas mostraron síntomas de deficiencia o de toxicidad en sus hojas, y algunas murieron. Las plantas de sorgo cultivadas en el suelo de Palmira eran casi seis

veces más grandes que aquéllas cultivadas en el suelo de Carimagua (Cuadros 5 y 6); este suelo era más ácido, tenía menos P, Ca, Mg, y K disponibles, y tenía una cantidad de aluminio disponible más alta que la del suelo de Palmira (Cuadro 3).

Los genotipos que tuvieron los rendimientos más alto y más bajo de materia seca mostraron diferencias de 4.9 y 4.1 veces en las plantas cultivadas en los suelos de Carimagua y de Palmira, respectivamente (Cuadros 5 y 6). Los genotipos que tuvieron el rendimiento más alto y el más bajo de materia seca cuando se cultivaron en el suelo de Palmira no tuvieron los rendimientos más alto y más bajo, respectivamente, cuando se cultivaron en el suelo de Carimagua.

Los genotipos cultivados en el suelo de Carimagua con las concentraciones más altas y más bajas de elementos minerales no tuvieron las concentraciones más altas o más bajas, respectivamente, cuando se cultivaron en el suelo de Palmira. Con excepción de S, Cl y Zn, las hojas de las plantas cultivadas en el suelo de Palmira tenían concentraciones promedio más altas de elementos minerales (unas dos veces más) que las hojas de plantas cultivadas en el suelo de Carimagua (Cuadro 5). Las concentraciones promedio de S, Cl, y Zn en las hojas de las plantas cultivadas en los suelos de Carimagua y Palmira fueron similares. Ningún elemento fue más bajo en las hojas de las plantas cultivadas en el suelo de Palmira que en las hojas de las plantas cultivadas en el suelo de Carimagua. No se detectó aluminio en las hojas de las plantas cultivadas en el suelo de Palmira (el límite más bajo detectable de aluminio fue de 130 mg/g), pero se midió fácilmente en las hojas de plantas cultivadas en el suelo de Carimagua. No se registró ninguna concentración de aluminio disponible en el análisis del suelo de Palmira (Cuadro 3).

Las diferencias entre los rangos de los genotipos para las concentraciones de elementos minerales fueron más grandes en las plantas cultivadas en el suelo de Carimagua que en las plantas cultivadas en el suelo de Palmira (Cuadros 5 y 6). Si se consideran normales los rangos obtenidos en las plantas cultivadas en el suelo de Palmira (Cuadro 6), entonces los elementos Ca, Cl, Si, Mn, y Zn tuvieron diferencias de rangos mayores que las normales en las plantas cultivadas en el suelo de Carimagua (Cuadro 5).

En las plantas cultivadas en el suelo de Carimagua, la diferencia de rango para las concentraciones de Al en las hojas fue

Cuadro 5. Rendimiento de materia seca (RMS), rango de concentración (CN) y de contenido (CT) de elementos minerales, media, error estándar de la media ($ES_{\bar{x}}$), y relación de valores máximo/mínimo de CN y CT para 60 genotipos de sorgo desarrollados en un suelo de Carimagua, Colombia, en el invernadero (experimento 1).

Elemento (o MS)	Concentración del elemento ^a					Contenido del elemento ^a				
	Rango		Media	$ES_{\bar{x}}$	Max./Min.	Rango		Media	$ES_{\bar{x}}$	Max./Min.
	Min.	Max.				Min.	Max.			
	mg/planta									
RMS	16.3	79.7	47.8	1.2	4.9					
	mg/g					$\mu\text{g/planta}$				
P	1.00	2.29	1.29	0.02	2.3	30	98	60	2	3.3
K	15.2	31.2	23.9	0.40	2.1	381	2070	1160	40	5.4
Ca	0.81	3.09	2.08	0.04	3.8	19	203	102	4	10.5
Mg	2.37	4.86	3.74	0.06	2.1	60	321	182	6	5.4
S	1.55	2.66	2.07	0.02	1.7	36	161	99	3	4.4
Cl	1.99	9.20	4.88	0.20	4.6	52	613	242	14	11.9
Si	1.73	6.60	4.11	0.11	3.8	44	494	204	9	11.3
	$\mu\text{g/g}$					$\mu\text{g/planta}$				
Al	130	956	389	22.0	7.1	5.2	48.7	17.5	1.00	9.4
Mn	34.4	112.2	72.1	1.4	3.3	0.79	7.18	3.46	0.11	9.1
Fe	146	408	251	7.0	2.8	4.0	23.4	11.8	0.40	5.8
Cu	18.8	47.1	34.9	0.5	2.5	0.49	3.32	1.71	0.06	6.8
Zn	26.2	88.9	56.5	1.5	3.4	0.64	5.84	2.79	0.12	9.1

a. Max./Min. = intensidad de cambio notada entre genotipos superiores e inferiores. La relación Max./Min. de las diferencias sobre Al puede haber sido más grande que este valor, ya que el límite inferior de detección fue 130 $\mu\text{g/g}$.

Cuadro 6. Rendimiento de materia seca (RMS), rango de concentración (CN) y de contenido (CT) de elementos minerales, media, error estándar de la media ($ES\bar{x}$), y relación de valores máximo/mínimo de CN y CT para 60 genotipos de sorgo desarrollados en un suelo de Palmira, Colombia, en el invernadero (experimento 1).

Elemento (o MS)	Concentración del elemento ^a					Contenido del elemento ^a				
	Rango					Rango				
	Min.	Max.	Media	$ES\bar{x}$	Max./Min.	Min.	Max.	Media	$ES\bar{x}$	Max./Min.
	mg/planta									
RMS	116	477	287	8.0	4.1					
	mg/g					$\mu\text{g/planta}$				
P	1.99	3.57	2.64	0.04	1.8	305	1290	723	17	4.2
K	38.0	58.5	46.0	0.40	1.5	4481	2400	1320	39	5.0
Ca	2.68	4.79	3.52	0.04	1.8	434	1730	995	27	4.0
Mg	3.92	6.21	4.83	0.06	1.6	470	2440	1370	40	5.2
S	1.50	2.50	2.00	0.03	1.7	235	967	553	14	4.1
Cl	3.31	7.31	5.08	0.16	2.2	573	2910	1390	50	5.1
Si	16.5	33.8	23.4	0.30	2.0	2980	13200	6720	220	4.4
	$\mu\text{g/g}$					$\mu\text{g/planta}$				
Mn	23.2	51.2	38.1	0.6	2.2	4.3	19.4	10.7	0.3	4.5
Fe	92	226	144	5.0	2.5	16.0	78.3	42.1	2.3	4.9
Cu	21.8	49.4	34.5	0.9	2.3	4.1	22.2	10.0	0.4	5.4
Zn	22.0	37.3	29.2	0.5	1.7	3.5	17.1	8.1	0.2	4.9

a. Max./Min. = intensidad de cambio notada entre los genotipos superiores e inferiores.

más alta que para cualquier otro elemento mineral analizado (Cuadro 5). Algunas hojas de las plantas cultivadas en el suelo de Carimagua tenían valores de Al cercanos al límite inferior de detección del método de análisis, es decir, que la concentración de Al era baja en algunos genotipos. En las hojas, las concentraciones de aluminio mayores de 200 a 400 $\mu\text{g/g}$ no se consideraron muy altas, ni tan exageradas como para que el Al pudiera interactuar fuertemente con otros elementos. Ya que el Al no se trasloca fácilmente de las raíces a las hojas del sorgo,¹ se espera que haya considerablemente más aluminio en las raíces que en las hojas. Como no se midió el aluminio en las raíces debido a su contaminación con suelo, no se estableció la severidad de las interacciones del Al con los otros elementos. Las raíces de las plantas de sorgo cultivadas en soluciones nutritivas que tengan Al pueden acumular cantidades relativamente altas de Al.¹

El silicio, aunque se encuentra muy rara vez en el tejido vegetal, mostró la mayor variación de concentración en las plantas cultivadas en los dos suelos (Cuadros 5 y 6). Las hojas de las plantas cultivadas en el suelo de Palmira tenían concentraciones promedio de Si 5.7 veces más altas que las de las hojas de plantas cultivadas en el suelo de Carimagua. En un estudio preliminar, se encontraron concentraciones de Si notoriamente más altas en las hojas de sorgo de plantas cultivadas en un suelo Ultisol encalado en Quilichao que en las hojas de plantas cultivadas en el mismo suelo sin encalar (datos no presentados). La información sobre la asociación del Si con la tolerancia o habilidad de la planta para superar la susceptibilidad a las condiciones ácidas del suelo no es muy clara, pero se ha informado que el Si supera la susceptibilidad de las plantas a la toxicidad del Mn y del Fe (Foy y otros, 1978; Werner y Roth, 1983). Las concentraciones de silicio en las hojas de plantas de sorgo cultivadas en suelo son frecuentemente superiores a 10 mg/g (Cuadros 6, 7 y 8; Werner y Roth, 1983).²

Los contenidos de P, K, Ca, Mg, S, Si, Mn, Fe, Cu y Zn fueron 12.1, 11.4, 9.8, 7.5, 5.6, 32.9, 3.1, 3.6, 5.9, y 2.9 veces más altos, respectivamente, en las hojas de las plantas cultivadas en el suelo de Palmira que en las hojas de las plantas cultivadas en el suelo de Carimagua (Cuadros 5 y 6). Asimismo, el elemento

1. Clark, R. B. Información sin publicar.

2. Además, Clark, R. B. Información sin publicar.

Cuadro 7. Rendimiento de materia seca (RMS), rango de concentración (CN) y de contenido (CT) de elementos minerales, media, error estándar de la media ($ES_{\bar{x}}$), y relación de valores máximo/mínimo de CN y CT para 60 genotipos de sorgo desarrollados en un suelo de Carimagua, Colombia, enclavado con 2 t/ha de cal dolomítica, en el campo (experimento 2).

Elemento (o parámetro)	Concentración del elemento ^a					Contenido del elemento ^a				
	Rango		Media	$ES_{\bar{x}}$	Max./Min.	Rango		Media	$ES_{\bar{x}}$	Max./Min.
	Min.	Max.				Min.	Max.			
Síntomas visuales ^b	1.0	4.0	2.3	0.1	4.0					
Altura de la planta (cm)	33	163	102	4.0	4.9					
Estado de madurez ^c	1.0	4.0	1.7	0.1	4.0					
RMS (mg/planta)	3.6	85.6	38.6	2.8	23.6					
	mg/g					mg/planta				
P	1.84	3.42	2.56	0.04	1.9	7.8	238.7	98.3	7.0	30.7
K	15.70	29.2	21.8	0.20	1.9	58	2270	861	67.0	39.4
Ca	1.51	4.49	2.43	0.06	3.0	8.1	209.9	88.8	5.9	25.8
Mg	1.22	2.66	1.88	0.03	2.2	4.2	150.1	72.9	5.4	35.6
S	1.24	2.26	1.70	0.02	0.9	4.9	131.6	63.8	4.0	26.8
Cl	0.85	4.57	2.35	0.09	5.4	3.3	352.8	92.9	8.8	106.0
Si	2.18	12.88	5.30	0.23	5.9	18	646	196	17.0	51.5
	μg/g					μg/planta				
Al	130 ^d	2650	592	42	20.4	38	715	189	16	18.6
Mn	38.5	91.8	61.1	1.2	2.4	0.21	5.83	2.33	0.17	27.9
Fe	264	1020	514	17	3.8	0.30	4.41	1.87	0.14	14.8
Cu	19.3	54.0	31.2	0.8	2.8	0.08	3.56	1.22	0.11	42.9
Zn	8.4	50.1	32.8	0.8	6.0	0.08	4.12	1.30	0.11	53.5

a. Max./Min. = intensidad de cambio observada entre genotipos superiores e inferiores. Ver además nota a., Cuadro 5.

b. Calificaciones del síntoma visual de deficiencia/toxicidad: 1.0 = ninguno, 2.0 = ligero, 3.0 = moderado, y 4.0 = severo.

c. Las descripciones del estado de madurez fueron: 1.0 = vegetativo, 2.0 = iniciación floral, 3.0 = floración, y 4.0 = llenado del grano (en leche).

d. Límite inferior de detección para el procedimiento analítico.

Cuadro 8. Rendimiento de materia seca (RMS), rango de concentración (CN) y de contenido (CT) de elementos minerales, media, error estándar de la media (ES \bar{x}), y relación de valores máximo/mínimo de CN y CT para 60 genotipos de sorgo desarrollados en un suelo de Carimagua, Colombia, enclavado con 6 t/ha de cal dolomítica, en el campo (experimento 2).

Elemento (o parámetro)	Concentración del elemento ^a					Contenido del elemento ^a				
	Rango					Rango				
	Min.	Max.	Media	ES \bar{x}	Max./Min.	Min.	Max.	Media	ES \bar{x}	Max./Min.
Síntomas visuales ^b	1.0	3.0	1.6	0.1	3.0					
Altura de la planta (cm)	70	192	124	5.0	2.7					
Estado de madurez ^c	1.0	4.0	2.0	0.1	4.0					
RMS (mg/planta)	18.2	75.3	40.0	2.0	4.1					
	mg/g					mg/planta				
P	1.96	3.46	2.76	0.04	1.8	44.0	233	110	6.0	5.4
K	14.8	26.9	21.6	0.20	1.8	381	1950	868	50.0	5.1
Ca	1.50	6.72	2.90	0.09	4.5	48.0	354	112	7.0	7.3
Mg	1.33	2.72	1.93	0.03	2.0	29.7	161	79.1	4.7	5.4
S	1.19	2.18	1.71	0.02	1.8	35.3	136	67.0	2.9	3.9
Cl	1.29	5.06	2.91	0.10	3.9	44.0	231	111	7.0	5.2
Si	2.42	16.9	6.95	0.32	7.0	92.0	842	266	19.0	9.2
	μg/g					μg/planta				
Al	130 ^d	966	372	18.0	7.4	27	381	148	10.0	13.9
Mn	22.0	74.0	46.4	1.2	3.4	0.68	4.33	1.88	0.12	6.4
Fe	154	438	280	8.0	2.8	0.43	2.34	1.11	0.07	5.5
Cu	21.3	56.5	35.9	0.7	2.6	0.57	3.08	1.46	0.09	5.4
Zn	18.2	56.0	35.0	0.8	3.1	0.63	3.15	1.40	0.07	5.0

a. Max./Min. = intensidad de cambio observada entre genotipos superiores e inferiores. Ver además nota a., Cuadro 5.

b. Calificaciones del síntoma visual de deficiencia/toxicidad: 1.0 = ninguno, 2.0 = ligero, 3.0 = moderado, y 4.0 = severo.

c. Las descripciones del estado de madurez fueron: 1.0 = vegetativo, 2.0 = iniciación floral, 3.0 = floración, y 4.0 = llenado del grano (en leche).

d. Límite inferior de detección para el procedimiento analítico.

mineral cuyo contenido mostró el cambio más grande en las hojas fue el Si. Aunque mucho menor que el cambio notado para el Si, también ocurrieron cambios marcados en P, K, Ca y Mg. Las diferencias de rango en los contenidos de los elementos minerales entre los genotipos fueron mayores en las hojas de las plantas cultivadas en el suelo de Carimagua que en las hojas de las plantas cultivadas en el suelo de Palmira.

Experimento 2

Los genotipos de sorgo mostraron diferencias notorias en el rendimiento de materia seca cuando se cultivaron en el campo en suelos de Carimagua encalados con 2 y 6 t/ha de roca dolomítica (Cuadros 7 y 8). Las diferencias fueron considerablemente más amplias para las plantas cultivadas en suelos encalados con 2 t/ha que para las plantas cultivadas en el suelo con 6 t/ha de cal. Las plantas con los rendimientos más altos de materia seca cultivadas en el suelo ácido con una aplicación de 2 t/ha de cal tuvieron rendimientos iguales, y en algunos casos superiores, a los de aquellas plantas con el rendimiento de materia seca más alto, cultivadas en suelos con una aplicación de 6 t/ha de cal. Sin embargo, las plantas con el rendimiento más bajo de materia seca, cultivadas en el suelo con la tasa de aplicación de cal más baja, fueron considerablemente más pequeñas que aquellas plantas con el rendimiento de materia seca más bajo cultivadas en el suelo con la tasa de aplicación más alta. En general, los síntomas visuales de deficiencia o de toxicidad fueron más severos en las plantas cultivadas en los suelos con 2 t/ha de cal que en las plantas cultivadas en los suelos con 6 t/ha de cal. Las plantas cultivadas en el suelo con la tasa de aplicación más baja de cal fueron generalmente más pequeñas y tuvieron una ligera demora en la madurez comparadas con las plantas cultivadas en el suelo con la tasa más alta de aplicación de cal.

Los rangos de concentración y los valores promedio para P, K, Mg, S, Cl y Cu en las hojas de las plantas cultivadas en suelos con aplicaciones de cal de 2 y 6 t/ha fueron similares (Cuadros 7 y 8). Aunque había diferencias entre estos elementos minerales para las plantas cultivadas en los suelos con las dos aplicaciones de cal, esas diferencias fueron relativamente pequeñas. Los elementos que mostraron el cambio de concentración más grande debido a las adiciones de cal fueron Ca, Si, Mn, Fe y Al. Como podía esperarse, la concentración promedio de Ca

en las hojas aumentó a medida que aumentaba la tasa de adición de cal al suelo. La concentración de silicio fue también más alta en las hojas de las plantas cultivadas en el suelo con 6 t/ha de cal que en las hojas de las plantas cultivadas en el suelo con 2 t/ha de cal. Las concentraciones de Mn, Fe, y Al fueron más bajas en el tejido de las hojas de plantas cultivadas en los suelos con el nivel más alto de cal que en las plantas cultivadas en el nivel más bajo de cal. El rango de concentración de Al fue especialmente amplio para las plantas cultivadas en el suelo con 2 t/ha de cal comparado con las plantas cultivadas en el suelo con 6 t/ha de cal. Las concentraciones bajas de Al en las hojas de las plantas cultivadas fueron muy similares independientemente del nivel de aplicación de cal, pero la concentración de Al en las hojas del genotipo con el contenido más alto de Al y cultivado en el suelo con la tasa de aplicación de cal más baja fue, aproximadamente, tres veces más alto que el nivel de concentración más alto de Al en el genotipo cultivado con la tasa de aplicación más alta de cal.

El contenido promedio de los elementos minerales en las plantas cultivadas en los suelos con aplicaciones de 2 y 6 t/ha de cal no fue muy diferente (Cuadros 7 y 8). Sin embargo, el rango del contenido de los elementos minerales mostró diferencias más amplias. Esto se debió a las diferencias en el rango de rendimiento de materia seca. Las diferencias de rango en el contenido de elementos para plantas cultivadas en el suelo con 2 t/ha de cal fueron considerablemente más amplias que para las plantas cultivadas en el suelo con 6 t/ha de cal. Se encontraron diferencias entre rangos de 20 a 50 veces más grandes en el contenido de los elementos para las plantas cultivadas en el suelo con la tasa de aplicación de cal más baja. Los elementos minerales que mostraron las mayores diferencias de rango en cuanto al contenido fueron Cl, Zn, Si, y Cu, y aquéllos que mostraron el rango de diferencias más pequeño fueron Fe y Al.

Conclusión

El contenido y la concentración de los elementos minerales en las hojas de las plantas cultivadas en los suelos colombianos usados en este estudio fueron más bajos cuando las aplicaciones de cal eran bajas y cuando el pH del suelo también lo era. Se encontraron diferencias de rango más amplias para el contenido que para la concentración de los elementos. Los que mostraron

el cambio más amplio en concentración fueron Ca, Si, Mn, Fe, y Al. Los cambios más grandes en el contenido de los elementos se notaron en Zn, Si y Cu.

El elemento que mostró algunos de los cambios más grandes en el tejido de las plantas cultivadas en suelos encalados o de pH más alto fue el Si. Rara vez se analiza el Si en el tejido vegetal, de modo que la mayoría de los estudios no registran los efectos o los cambios de este elemento. El silicio se puede asociar con una adaptación de las plantas a los suelos cuya acidez es baja. Algunos estudios han mostrado que el Si está asociado con una superación de la toxicidad del Mn y del Fe en algunas especies vegetales (Foy y otros, 1978; Werner y Roth, 1983). Se necesita mayor información sobre las relaciones del Si en el sorgo y en otras plantas, cuando se cultivan en suelos ácidos.

Se ha dicho que P, Ca, K y Mg son los elementos más afectados cuando las plantas se cultivan en suelos ácidos, pero estos elementos no mostraron cambios más grandes que muchos de los otros elementos. Cuando se evalúen plantas para medir su tolerancia a los suelos ácidos o infértiles valiéndose de los elementos minerales, es importante hacer un análisis completo del tejido.

Resumen

Las deficiencias y toxicidades de los elementos minerales son los problemas principales asociados con la adaptación del sorgo [*Sorghum bicolor* (L.) Moench] cultivado en muchos suelos tropicales de América Latina, y con su producción. Para entender mejor esos problemas, se sembraron 60 genotipos de sorgo en suelos encalados y sin encalar en Carimagua (Oxisoles) y en Palmira (Alfisolos), en Colombia. Se evaluaron y determinaron las diferencias entre los genotipos en relación con su absorción y acumulación de elementos minerales. Las concentraciones de fósforo, potasio, magnesio, calcio, cobre, y silicio fueron bajas; las de manganeso, hierro y aluminio fueron más altas; y las de cloro, azufre y zinc permanecieron estables; así ocurrió tanto en las hojas de las plantas cultivadas en los suelos ácidos (Carimagua) como en las hojas de las plantas cultivadas en un suelo neutro (Palmira).

Las concentraciones de calcio y silicio aumentaron mientras que las de hierro y aluminio disminuyeron en las hojas de las plantas cultivadas en un suelo de Carimagua cuando se aplicaron

1 y 6 t/ha de cal. Se encontraron amplias diferencias entre genotipos para esas concentraciones, y especialmente para el contenido de cada elemento, en las hojas de las plantas cultivadas en los diferentes suelos y con diferentes tasas de aplicación de cal al suelo de Carimagua. Las diferencias entre el contenido de los elementos se pueden utilizar fácilmente para evaluar las diferencias entre genotipos que toleran las condiciones de los suelos ácidos tropicales. Los elementos que mostraron rangos consistentemente amplios entre los genotipos fueron el aluminio y el silicio. El silicio puede estar relacionado con la tolerancia de las plantas a los suelos ácidos. Se describe también el método utilizado (fluorescencia de rayos X) para analizar la presencia de minerales en las muestras vegetales.

Referencias

- Foy, C. D.; Chaney, R. L. y White, M. C. 1978. The physiology of metal toxicity in plants. *Ann. Rev. Plant Physiol.* 29:511-566.
- Knudsen, D.; Clark, R. B.; Denning, J. L. y Pier, P. A. 1981. Plant analysis of trace elements by X-ray. *J. Plant Nutri.* 3:61-75.
- Sánchez, P. A. y Salinas, J. C. 1981. Low-input technology for managing Oxisols and Ultisols in tropical America. *Adv. Agron.* 34:279-405.
- Werner, D. y Roth, R. 1983. Silica metabolism. En: Lauchli, A. y Bielecki, R. L. (eds.). *Inorganic plant nutrition. Encyclopedia of plant physiology, New series, v. 15B.* Springer-Verlag, Nueva York, NY, E.U. p. 682-694.

Mejoramiento de Sorgos Tolerantes al Aluminio

*R. A. Borgonovi, R. E. Schaffert y G. V. E. Pitta**

Introducción

La región del 'Cerrado' en el Brasil es la frontera agrícola de los ochentas. Esta vasta región, de la cual una vez se pensó que no era adecuada para la producción de cultivos, está recibiendo ahora la atención que merece tanto de los hacedores de políticas como de los investigadores agrícolas. Se espera que esta región sea, para el final de este siglo, el principal productor de alimentos tanto para humanos como para animales. El Cerrado tiene sus peculiaridades y problemas, y se debe generar más tecnología para que sea completamente explotado en todo su potencial agrícola (Alves, 1983).

Distribución y Caracterización de la Región del Cerrado

El área cubierta por la vegetación de 'cerrado' en el Brasil ocupa aproximadamente 180 millones de hectáreas, o sea, aproximadamente, el 20% del área total del país. El Cerrado está distribuido en cuatro de las cinco regiones principales de Brasil (Figura 1): el Centro Occidente, el Sureste, el Noreste y el Norte (Ferri, 1977; Goedert et al., 1980).

El clima de la mayor parte de los Cerrados se puede clasificar como húmedo y caliente, con una estación seca prolongada. La temperatura diaria promedio varía de 20 a 26 °C, y la precipitación promedio anual varía de 1000 a 2000 mm (Lopes, 1983).

* Respectivamente: mejorador de sorgo (fallecido) del Centro Nacional de Pesquisa de Milho e Sorgo (CNPMS)/Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA); especialista en sorgo, Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA)/EMBRAPA; y edafólogo (CNPMS)/EMBRAPA, Sete Lagoas, MG, Brasil.

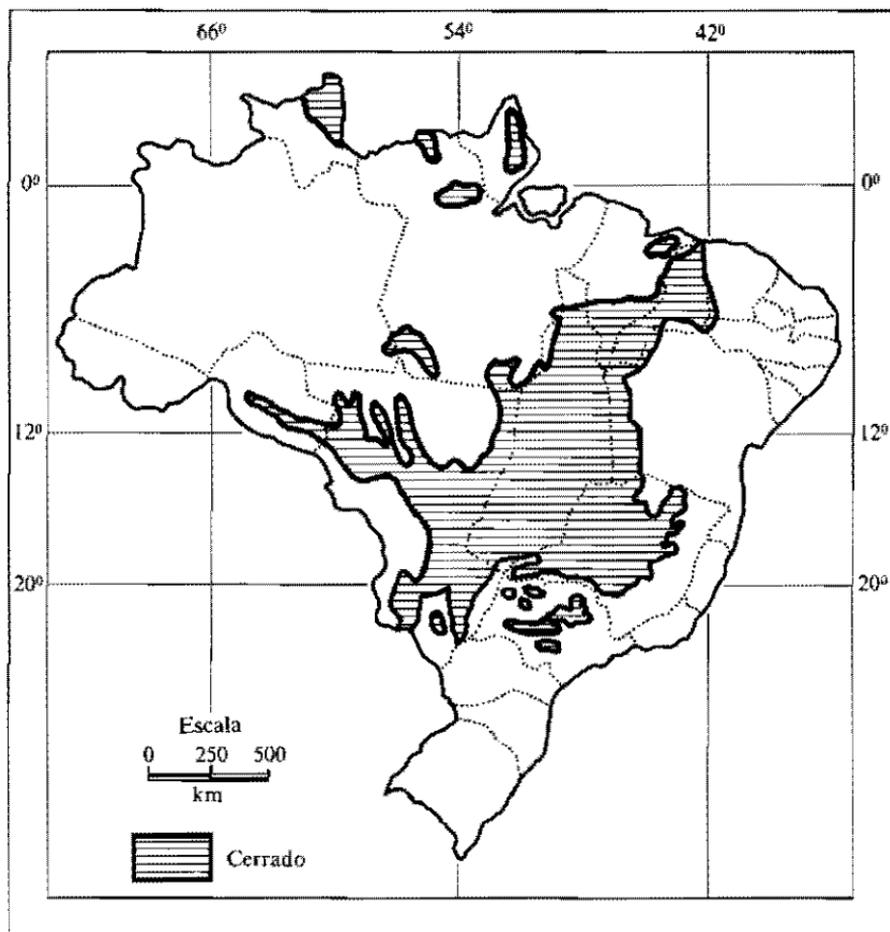


Figura 1. Distribución del Cerrado y de las áreas de transición del Brasil.

FUENTE: EMBRAPA, 1978.

El estrés de agua es común durante la estación lluviosa y frecuentemente reduce el rendimiento de los diferentes cultivos de la región (Goedert et al., 1983). Wolf (1977) mostró también que ocurrían a menudo períodos de una a cuatro semanas sin lluvias, complicados con altos niveles de radiación solar y alta evapotranspiración potencial (Figura 2). Estos períodos se llaman 'veranicos' y pueden causar serias limitaciones a los cultivos anuales sensibles cuando no hay irrigación suplementaria (Lopes, 1983).

La topografía de estas áreas cubiertas por la vegetación del Cerrado se caracteriza por ser plana o ligeramente ondulada, lo que facilita su mecanización (Goedert et al., 1980).

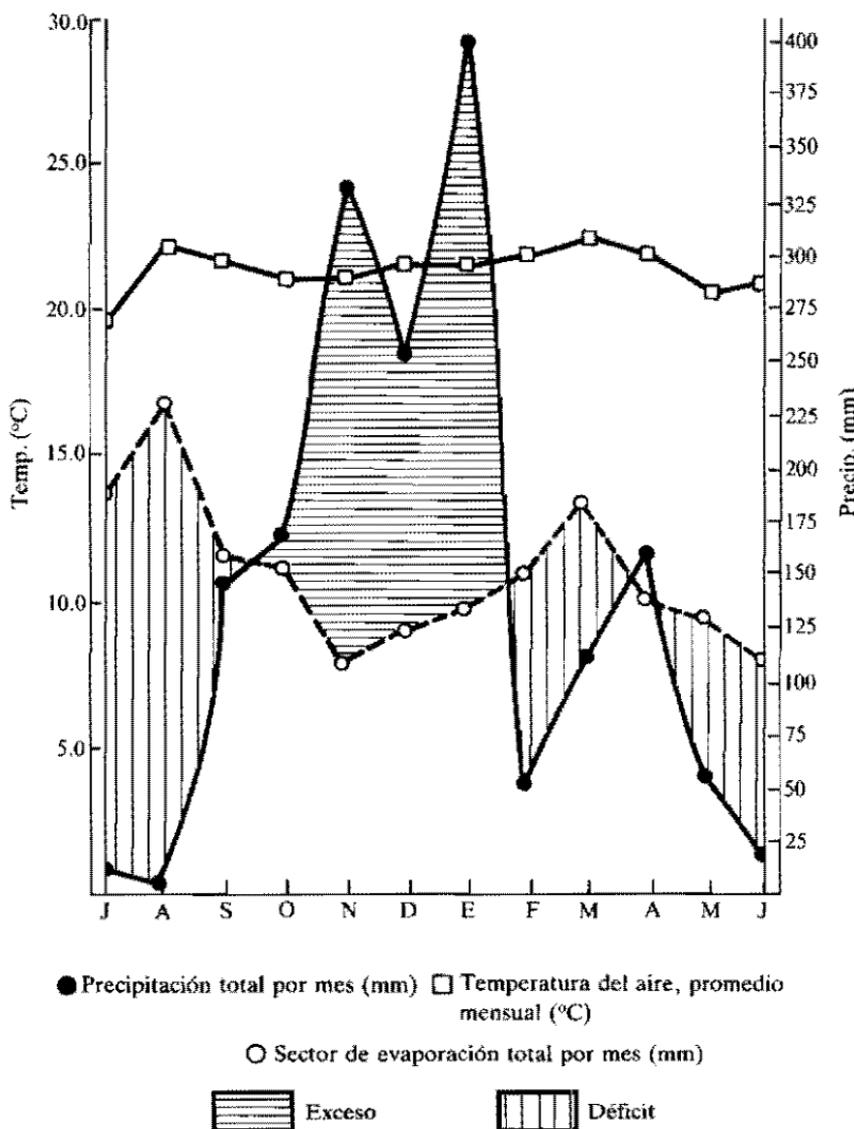


Figura 2. Principales características climáticas de la región del Cerrado

FUENTE: EMBRAPA-CPAC, 1978.

El 56% del área cubierta por la vegetación del Cerrado está clasificada como latosol rojo amarillento, latosol rojo oscuro, y latosol rojo, de acuerdo con Sánchez et al. (1974). La gran mayoría de estos suelos son infértiles debido a la alta capacidad de adsorción de fósforo, al bajo pH, a la alta saturación de aluminio, a la baja capacidad de intercambio catiónico, y a una

deficiencia generalizada de nutrimentos, principalmente fósforo, nitrógeno, potasio, calcio, magnesio y zinc (Lopes y Cox, 1977; EMBRAPA, 1978). Los latosoles tienen normalmente un alto contenido de arcilla, pero debido a su estructura la tasa de infiltración de agua es alta y su capacidad de retención de agua es baja, lo que agrava la situación de un contenido limitado de agua en estos suelos (Lopes, 1983).

El Potencial de la Región del Cerrado para la Producción de Granos

Actualmente, casi el 10% de la producción total de grano en Brasil (incluyendo la soya) se obtiene en los Cerrados (Goedert et al., 1980). Considerando que la ocupación y exploración de los Cerrados para la producción de granos se ha acelerado recientemente con programas especiales tales como el POLOCENTRO, los autores también estiman que dentro de los próximos 20 años (se han incorporado 2 millones de hectáreas por año) habrá en los Cerrados 50 millones de hectáreas arables en producción de cultivos. Se espera que los principales cultivos sean frijol, maíz, soya, sorgo granífero y trigo. Se espera también que el área cultivada con sorgo (Cuadro 1) sea un 4% del área total. Sin embargo, considerando que uno de los sistemas de producción de sorgo recomendados por la investigación y adoptados por los agricultores en los estados de Goiás del Sur y Minas Gerais (región del Triángulo) es la intercalación de sorgo y soya (EMGOPA, 1978; 1979; 1980; 1981; EPAMIG, 1981), el área sembrada con sorgo deberá ser considerablemente más grande que aquella sugerida anteriormente por Goedert y otros

Cuadro 1. Proyección hasta el año 2000 de la producción total de granos y de la producción de sorgo granífero en la región del Cerrado de Brasil, si se utiliza la tecnología avanzada recomendada para la región.

Situación	Área (millones ha)	Rendimiento (t/ha al año)	Producción anual (millones t)
Actual (total de granos)	5.0	1.5	7.5
Proyectada (total de granos) ^a	50.0	2.5	125.0
Proyectada (sorgo)	2.0	4.0	8.0

a. Considerando el arroz (15%), frijoles (4%), maíz (20%), soya (35%), sorgo granífero (4%), trigo (4%), y otros cultivos (18%) después de 20 años de desarrollo.

FUENTE: Goedert et al., 1980.

(1980). En este caso, considerando que el 20% del área total dedicada a la soya se podrá cultivar fácilmente asociada con el sorgo, la producción de sorgo granífero proyectada para el año 2000 será de 15 millones de toneladas al año (Cuadro 2).

Cuadro 2. Proyección hasta el año 2000 del rendimiento de grano, de la producción y del área sembrada con sorgo granífero en la región del Cerrado de Brasil, en dos sistemas de producción.

Sistema de producción	Área (millones ha)	Rendimiento (t/ha al año)	Producción anual (millones t)
Cultivo principal ^a	2.0	4.0	8.0
Soya y sorgo (cultivo doble) ^b	3.5	2.0	7.0
Total	5.5	—	15.0

a. Del área total, 4% para producción del grano.

b. Del área sembrada, 20% con soya.

FUENTE: Goedert et al., 1980.

Aceptando que los estimados de los Cuadros 1 y 2 son válidos, debemos evaluar la tecnología disponible para la producción de sorgo, respecto a los factores que puedan afectar estas metas. Un análisis completo involucraría varios factores, como la aplicación de cal y de fertilizantes, el uso de variedades adaptadas, el tipo de equipo para el manejo de la finca, etc., que escapa al alcance de este trabajo. Por esta razón, discutiremos solamente el comportamiento de los híbridos graníferos que están disponibles actualmente.

Los resultados de la producción de sorgo para grano en varias localidades han demostrado que las variedades comerciales no se han desarrollado satisfactoriamente sin el uso de una aplicación de niveles adecuados de cal y fertilizantes (EMBRAPA, 1978; 1979; EPAMIG, 1979).

El uso de altas tasas de aplicación de cal para corregir la acidez del suelo, en muchos casos, no ha sido económico debido a los costos elevados, como transporte, aplicación y crédito. Además, desde el punto de vista técnico y económico no es factible, generalmente, incorporar la cal en el subsuelo; la acidez encontrada en éste impide el crecimiento radicular, principalmente el de aquellas especies y cultivares sensibles al aluminio (Foy, 1974), haciendo que las plantas más susceptibles sufran estrés de humedad en los 'veranicos' que ocurren durante la época de

cultivo. Por esta razón, es sin duda obvia la importancia de desarrollar cultivares con tolerancia a niveles tóxicos de aluminio y a otros factores limitativos de estos suelos del Cerrado, o sea, del 'complejo de suelos del Cerrado'. Se espera que las especies y cultivares mejor adaptados a ese complejo de suelos tengan un mayor potencial de rendimiento y, por tanto, un menor factor de riesgo en la producción debido a una demanda más baja de cal y fertilizantes. Los términos 'tolerancia al complejo de suelos del Cerrado', 'tolerancia a la toxicidad del aluminio' y 'tolerancia al aluminio' se intercambian uno por otro en este capítulo. Se debe tener en cuenta que el término tolerancia al aluminio, en este caso, es un tópico complicado no muy bien entendido.

Tolerancia al Aluminio en el Sorgo para el Complejo de Suelos del Cerrado

El programa de investigación para evaluar la tolerancia del sorgo a las condiciones bajas de pH y de alta saturación de aluminio, que predominan en los suelos cubiertos por la vegetación del Cerrado, se inició en el Centro Nacional de Investigación en Maíz y Sorgo (CNPMS) de EMBRAPA, en 1974. Desde 1975 se han publicado varios trabajos (Schaffert et al., 1975; Pitta et al., 1976; 1979b) relacionados con el rango de variabilidad genética de la tolerancia al aluminio en el sorgo, los métodos de selección (dos Santos et al., 1980; Malavolta et al., 1981), la respuesta del sorgo a los niveles de encalamiento y la profundidad de incorporación de la cal (Salinas et al., 1976), el control genético de la tolerancia al aluminio (Schaffert et al., 1975; Pitta et al., 1979a), y sobre muchos otros tópicos relacionados. También se inició un programa de mejoramiento genético para desarrollar cultivares adaptados y poblaciones de entrecruzamiento aleatorio con altos niveles de tolerancia a la toxicidad de aluminio (Borgonovi et al., 1982).

Schaffert et al. (1975) evaluaron 30 híbridos de sorgo granífero bajo condiciones de campo y mostraron que la variabilidad en la tolerancia a la sequía estaba estrechamente relacionada con el crecimiento radicular diferencial que estaba asociado con la variabilidad genética de la tolerancia al aluminio entre los híbridos. Más tarde, en experimentos hechos en el invernadero usando un suelo latosol rojo oscuro de la fase Cerrado (Cuadro 3), se mostró que el híbrido experimental Wheatland x TX 2536 y el híbrido comercial Taylor Evans Y 101 tenían un desarrollo

Cuadro 3. Algunas de las características químicas del latosol rojo oscuro, fase del Cerrado, a dos niveles de aplicación de cal y en dos profundidades de suelo, empleadas para evaluar el germoplasma de sorgo y desarrollar cultivares en el CNPMS/EMBRAPA, Sete Lagoas, Minas Gerais, Brasil.

Cal (t/ha)	Profundidad del suelo (cm)	pH (en H ₂ O)	Cationes (meq/kg)				P (ppm)	Saturación de aluminio* (%)
			Al	Ca	Mg	K		
0	0-20	4.7	21.0	11.0	3.0	1.9	3	62
	20-40	4.6	23.0	8.0	2.5	1.7	2	66
2	0-20	4.8	14.0	19.0	2.7	1.5	3	41
	20-40	4.6	19.0	9.0	2.2	1.2	2	59

$$a. \% \text{ Al} = \frac{\text{Al}}{\text{Al} + \text{Ca} + \text{Mg} + \text{K}} \times 100.$$

radicular mayor que el híbrido más sensible RS 610. También se observó que los híbridos tolerantes no desarrollaron ni las raíces decoloradas ni las hojas bronceadas, síntomas frecuentemente asociados con la toxicidad de aluminio (Foy et al., 1978). Schaffert et al. (1975) mostraron que había una variabilidad genética en el desarrollo radicular, lo que hacía pensar que la selección respecto a la tolerancia a la toxicidad del aluminio debería ser exitosa.

Pitta et al. (1976; 1979b) evaluaron 1200 líneas de sorgo de varios orígenes bajo condiciones de campo, con una saturación de aluminio que variaba entre el 40% y el 60%, e identificaron unas pocas líneas con buena tolerancia al aluminio, principalmente germoplasma originario de Uganda y Tanzania. Estos autores observaron también que varias líneas eran afectadas negativamente debido a la alta incidencia de enfermedades foliares. Las características agronómicas evaluadas fueron: síntomas fenotípicos de toxicidad de aluminio en la planta, producción de grano, índice de cosecha y reacción a enfermedades foliares. Los resultados obtenidos mostraron una buena correlación entre la evaluación fenotípica y el índice de cosecha con la tolerancia al aluminio.

Se han utilizado varios métodos de selección de plantas de sorgo en soluciones nutritivas y en suelos de invernadero, para identificar diferencias en la tolerancia al aluminio. Salinas y Sánchez (1978) utilizaron una solución nutritiva con dos niveles de aluminio (0 y 8 ppm) y dos niveles de P (0.05 y 0.20 ppm) para cuantificar la tasa relativa de crecimiento (TRC) y la tasa relativa de extensión radicular (TER) como herramientas para

caracterizar la tolerancia al aluminio en cinco genotipos de sorgo. Se evaluaron dos híbridos comerciales (TE Y 101 y RS 610) y tres líneas en mejoramiento (SC112-14, SC 3349 y TX 7078). La respuesta de la tasa de crecimiento radicular y de la TER fue muy similar al valor más alto alcanzado por la TRC, con 8 ppm de Al y 0.05 ppm de P. El híbrido TE Y 101 fue el cultivar más eficiente bajo los estreses de P, de Al, y de P y Al combinados. Dos Santos et al. (1980) obtuvieron correlaciones significativas entre los experimentos de campo y los de invernadero en cuanto a la tolerancia a la toxicidad de aluminio. Los coeficientes de correlación entre las variables al 64% de saturación de aluminio fueron: peso de parte aérea x rendimiento de grano (0.72**), y peso de raíces por rendimiento de grano (0.64**). Malavolta et al. (1981) evaluaron 30 híbridos de sorgo granífero en solución nutritiva con cinco niveles de Al (0, 3, 6, 12 y 24 ppm) y concluyeron que el peso seco total de las plántulas (parte aérea y raíces) después de 3 semanas de crecimiento era un estimativo mejor de la tolerancia al aluminio que el peso de la parte aérea de la plántula, el peso de la raíz, la altura de la plántula o la longitud de la raíz. La concentración de aluminio que mejor diferenciaba los genotipos fue la de 12 ppm. TE Y 101 y tres híbridos experimentales fueron los genotipos más tolerantes.

Salinas et al. (1976) evaluaron dos híbridos de sorgo granífero (TE Y 101 y RS 610) que habían mostrado diferencias en su tolerancia al aluminio en un experimento de campo con cinco tasas de aplicación de cal (0, 1, 2, 4, y 8 t/ha) y con dos profundidades de incorporación de cal (0 a 15 cm y 0 a 30 cm). Las diferencias entre los tratamientos estuvieron directamente relacionadas con el nivel de saturación de aluminio en los primeros 15 cm del suelo. El rendimiento de grano del híbrido tolerante TE Y 101 estuvo menos afectado y respondió menos a la incorporación profunda de cal que el RS 610. El tratamiento sin encalado, y los de 1 y 2 t/ha de cal fueron los mejores niveles para diferenciar los genotipos tolerantes y susceptibles al aluminio.

Los resultados de Schaffert et al. (1975), Pitta et al. (1979a) y Furlani y Bastos¹ en experimentos de campo y en solución nutritiva sugieren que la herencia de la tolerancia a la toxicidad de aluminio está controlada por un número pequeño de genes principales con efecto dominante, posiblemente un gen parcialmente dominante y un número de genes modificadores con efectos menores.

1. Comunicación personal, 1984.

Mejoramiento del Sorgo por Tolerancia a la Toxicidad del Aluminio

Estrategia del programa para la producción de sorgo

Las tres alternativas básicas que se pueden usar en el Cerrado para la producción de sorgo son las siguientes:

La modificación del ambiente edáfico por medio de la neutralización de la acidez del suelo y de la aplicación de nutrimentos hasta que se alcancen los requerimientos de la planta. El uso de esta alternativa tiene restricciones muy serias debido al alto costo de la cal y de los fertilizantes, así como del transporte y de la aplicación de aquéllos.

La adaptación de la planta a las características del suelo por medio de la manipulación genética, ya sea por ingeniería genética o usando métodos tradicionales de fitomejoramiento. Esta alternativa ha recibido recientemente una atención considerable por parte de varios investigadores, y hay varias publicaciones sobre una variación genética amplia en la tolerancia a la toxicidad del aluminio (Bastos, 1981; Brown y Jones, 1977; Duncan, 1981a; 1981b; Furlani, 1979; 1981; Pitta et al., 1976; 1979; Sánchez y Salinas, 1976; Schaffert et al., 1975). Sin embargo, es dudoso que la variación genética disponible sea adecuada para modificar la planta de sorgo hasta un potencial de rendimiento apropiado para su producción en la mayoría de los suelos del Cerrado.

La combinación de las alternativas uno y dos (estrategia seguida por el CNPMS), incluyendo una modificación gradual del suelo por medio de una reducción en la aplicación de cal y de fertilizantes asociada con el desarrollo de cultivares seleccionados más tolerantes al aluminio y con mejor eficiencia en el uso de nutrimentos. Esta combinación debe proveer una mayor eficiencia en la utilización de los nutrimentos permitiendo que el sistema radical de las plantas tolerantes al aluminio absorba el agua y los nutrimentos del subsuelo, y reduciendo de esta forma el efecto de los 'veranicos' que ocurren frecuentemente. Varios autores han sugerido esta alternativa para la exploración de suelos difíciles (Brown, 1979; Epstein, 1976; Fox y Fleming, 1976; Clark y Brown, 1980; Salinas et al., 1976).

En la estación del CNPMS/EMBRAPA en Sete Lagoas, MG, Brasil, el objetivo del programa de mejoramiento de sorgo para suelos altamente ácidos es desarrollar cultivares con un potencial

de rendimiento adecuado en suelos cuya saturación de aluminio esté entre el 40% y el 50%. Este rango está basado en la imposibilidad de una sustitución total de la cal en los suelos ácidos. Esta saturación de aluminio se alcanza generalmente con 2 ó 3 t/ha de cal. En este programa de mejoramiento se deben enfatizar dos puntos: a) es necesario combinar niveles adecuados de tolerancia al aluminio con buen potencial de rendimiento para obtener genotipos con un potencial de rendimiento adecuado y estable (estos tipos no se han identificado en el germoplasma de sorgo seleccionado por su tolerancia al aluminio; b) el mantenimiento de un nivel mínimo de resistencia a las principales enfermedades foliares, principalmente antracnosis y roya, que están ampliamente distribuidas (Fernandes y Schaffert, 1980) y que tienen potencial para limitar la expansión del sorgo en esta región.

Métodos de Selección de Tolerancia al Aluminio

Selección en el invernadero

En la literatura se han descrito varios métodos para evaluar el germoplasma de sorgo y los materiales segregantes en mejoramiento bajo condiciones de invernadero, utilizando ya sea suelo o soluciones nutritivas (Konzak et al., 1976; Brown y Jones, 1977; Santos et al., 1980; Furlani y Clark, 1981; Malavolta et al., 1981; Furlani, 1981; Bastos y Gourley, 1982). En general, éstos involucran el uso de soluciones nutritivas que facilitan el manejo de las plantas y la evaluación de sus sistemas radiculares.

Los experimentos para la selección del germoplasma llevados a cabo en el invernadero, en el CNPMS/EMBRAPA, para identificar las líneas de sorgo y las familias segregantes con diferentes grados de tolerancia al aluminio empezaron con la metodología sugerida por Clark (1975) y más recientemente con las técnicas propuestas por Furlani y Clark (1981), Furlani (1981), y Magnavaca (1982). Las semillas se ponen a germinar en papel toalla enrollado en tubos, colocados verticalmente en el agua, y aireados durante siete días. Al octavo día, se examinan las plántulas para buscar posibles daños radiculares, y se mide y registra la longitud inicial de la raíz seminal (LIRS). La solución nutritiva utilizada es la recomendada por Magnavaca (1982) excepto por una pequeña diferencia en la concentración de Al. La fuente de aluminio es $KAl(SO_4)_2 \cdot 12 H_2O$ y la concentración del Al es

de 180 μM (4.8 ppm). El pH de la solución se ajusta inicialmente a 4.0. La composición de la solución nutritiva se presenta en el Cuadro 4.

En cada recipiente se colocan 8 $\frac{1}{2}$ litros de la solución nutritiva. Una cubierta de plexiglás se suspende en el recipiente; tiene 49 huecos de 20 mm de diámetro para colocar las plántulas jóvenes, y dos huecos de 10 mm para la aireación y la monitoría del sistema. Las plántulas se fijan en las perforaciones con piezas de caucho esponjoso de tal forma que no se impida el desarrollo de las raíces adventicias. La solución nutritiva se mantiene con una aireación constante durante el período de crecimiento, que normalmente es de 10 a 12 días.

Al final del período de crecimiento se retiran las plántulas y se examinan visualmente las raíces para buscar síntomas de toxicidad de aluminio. Se mide y registra entonces la longitud final de la raíz seminal (LFRS) y la longitud de las raíces adventicias para cada planta. El crecimiento radicular seminal relativo (CRSR) se calcula de la siguiente manera (Furlani, 1981):

$$\text{CRSR (\%)} = \left[\frac{\text{ISRL}}{\text{FSRL}} - 1 \right] \times 100$$

Selección de campo

La selección de campo del germoplasma de sorgo y de los materiales segregantes en mejoramiento respecto a la tolerancia al aluminio está restringida normalmente debido a la desuniformidad de las áreas experimentales con respecto a los niveles de saturación de aluminio, de fósforo y de potasio. Con el objeto de minimizar estos problemas se utiliza el siguiente procedimiento para preparar un área más uniforme:

1. Identificación de un suelo virgen con alta saturación de aluminio.
2. Determinación de una curva de respuesta, y aplicación de cal para obtener un nivel deseado de saturación de aluminio, entre el 40% y el 50%.
3. Aplicación a voleo e incorporación de fósforo, como superfosfato simple, y de potasio, como KCl.

Cuadro 4. Composición de la solución nutritiva empleada para el crecimiento de las plantas de sorgo, en CNPMS/EMBRAPA, en Sete Lagoas, MG, Brasil.

Solución de reserva			Solución nutritiva concentrada						
Elemento	Compuesto químico	Concentración (g/lit)	Reserva (ml/lit)	Cationes (mg/lit)	Aniones (mg/lit)	Composición total			
						Elemento	(mg/lit)	(μ M)	
Ca	Ca(NO ₃) ₂ ·4H ₂ O	270	3.08	Ca ⁺⁺ = 141.1 NH ₄ ⁺ = 18.2 (por N)	NO ₃ ⁻ = 98.6 NO ₃ ⁻ = 18.2 (por N)	Ca	141.1	3,527	
	NH ₄ NO ₃	33.8				K	90.1	3,410	
K	KCl	18.6	2.31	K ⁺ = 22.5 K ⁺ = 45.6 K ⁺ = 22.0	Cl ⁻ = 20.4 SO ₄ ⁼ (S) = 18.7 NO ₃ ⁻ = 7.9 (por N)	N(NO ₃)	144.1	10,293	
	K ₂ SO ₄	44.0				N (H ₄ ⁺)	18.2	1,300	
	KNO ₃	24.6				P	1.4	45	
Mg	Mg(NO ₃) ₂ ·6H ₂ O	142.4	1.54	Mg ⁺⁺ = 20.8	NO ₃ ⁻ = 24.0 (por N)	S	18.8	587	
P	KH ₂ PO ₄	17.6	0.35	K ⁺ = 1.7	H ₂ PO ₄ ⁻ = 1.4	B	0.27	25	
Fe	Fe(NO ₃) ₃ ·9H ₂ O	20.3	1.54	Fe ⁺⁺⁺ = 4.3	NO ₃ ⁻ = 3.3 (por N)	Cl	21.05	596	
	H-EDTA	13.4				H-EDTA = 20.6	Fe	4.3	77
Micro- elementos	MnCl ₂ ·4H ₂ O	2.34	0.77	Mn ⁺⁺ = 0.5	Cl ⁻ = 0.65 BO ₃ ⁼ (B) = 0.27 SO ₄ ⁼ (S) = 0.07 SO ₄ ⁼ (S) = 0.02 MoO ₄ ⁼ = 0.08 (por Mo)	Mn	0.5	9.1	
	H ₃ BO ₃	2.04				Cu	0.04	0.63	
	ZnSO ₄ ·7H ₂ O	0.88				Zn ⁺⁺ = 0.15	Mo	0.08	0.83
	CuSO ₄ ·5H ₂ O	0.20				Cu ⁺⁺ = 0.04	Na	0.04	1.74
	Na ₂ MoO ₄ ·2H ₂ O	0.26				Na ⁺ = 0.04	H-EDTA	20.6	75

FUENTE: Magnavaca, 1982.

Esta técnica no sólo mejora la uniformidad química del área sino que también tiende a minimizar el efecto de la disponibilidad diferencial de los nutrimentos para las plantas. El nitrógeno es el único fertilizante que se aplica en bandas.

Durante el período de crecimiento se evalúan las plantas y las muestras de suelo de tal forma que se pueda vigilar la concentración del aluminio, el estado de los nutrimentos (P, Mg, Zn), y la humedad del suelo. Las diferencias en el contenido de humedad de las plantas durante el 'veranico' indican probablemente un crecimiento radicular diferencial. También se registran características agronómicas tales como la altura de la planta, la fecha de floración, la reacción a las enfermedades, la producción de grano, y el índice de cosecha.

Fuentes de Tolerancia a la Toxicidad de Aluminio

La metodología descrita anteriormente ha permitido al CNPMS identificar fuentes de tolerancia al aluminio y también confirmar los resultados de otros investigadores (Cuadro 5). Bajo condiciones de campo se seleccionaron los genotipos SC 283, SC 175-14, SC 418, SC 048 y SC 112-14, los cuales se pueden considerar tolerantes al complejo de suelos del Cerrado. Los otros genotipos presentados en el Cuadro 5 se seleccionaron a partir de estudios de invernadero (soluciones nutritivas o experimentos en suelo). Los genotipos con un CRSR menor del 20% fueron seleccionados debido a su comportamiento en condiciones de campo.

Los resultados indican que la selección hecha en soluciones nutritivas debe complementarse con una confirmación de campo que seleccione las fuentes de tolerancia al complejo de suelos del Cerrado y que identifique posibles escapes. La línea TX 623 ha mostrado consistentemente una reacción sensible en estudios tanto de campo como de invernadero.

La reacción de las líneas de sorgo Wheatland y TX 236 no indica, per se, una tolerancia a la toxicidad de aluminio. Sin embargo, el híbrido de estas dos líneas ha mostrado tolerancia en varios estudios (Schaffert et al., 1975; Salinas et al., 1976; dos Santos et al., 1980). Estos resultados sugieren la existencia de genes con efectos complementarios. Las raíces de Wheatland forman un sistema fibroso masivo bajo condiciones normales, y las raíces del TX 2536 permanecen blancas y no toman la

Cuadro 5. Reacción de algunas líneas de sorgo tolerantes al aluminio en una solución nutritiva de 4.8 ppm de aluminio, en CNPMS/EMBRAPA, Sete Lagous, MG, Brasil.

Identificación	Origen	Grupo	Reacción restauradora ^a	Crecimiento relativo de raíces seminales (%)
IS 7254 C (SC 566-14)	Nigeria	Caudatum	B	39.5
5 DX 61/6/2	Uganda	-	R	38.6
MN 1204	-	-	-	38.5
IS 7173 C (SC 283)	Tanzania	Conspicuum	B	34.2
IS 1335 C (SC 418)	Tanzania	Caudatum-Kafir	R	28.6
IS 12666 C (SC 175-14)	Etiopía	Zera-Zera	R	26.0
IS 3625 C (SC 549)	Nigeria	Conspicuum	R	23.4
Y 20-1-1-1	Uganda	-	R	20.4
156-P-5-Serere-1	Uganda	-	R	17.2
IS 12564 C (SX 048)	Sudán	Zera-Zera	R	15.5
IS 1309 C (SC 322)	Tanzania	Nigricans	PR	12.8
IS 7542 C (SC 408)	Nigeria	Caudatum-Guineense	R	12.7
3 DX 57/1/1/910	Uganda	-	R	11.9
(TX 2536 x SC 112-14) der	Brasil	-	R	11.8
IS 11612 C (SC 112-14)	Etiopía	Zera-Zera	R	8.7
TX 2536	E.U.	-	R	5.7
IS 8361 (Wheatland)	-	-	B	3.3
TX 623 (sensible al Al)	E.U.	-	B	4.5

a. B = No restauradora; PR = restaura parcialmente (produce un macho estéril citoplásmico) la fertilidad masculina en un híbrido. R = restaura plenamente (produce un macho estéril citoplásmico) la fertilidad masculina en un híbrido.

FUENTE: Borgonovi, R. A. et al. Información sin publicar.

coloración café oscura típica de los genotipos susceptibles bajo condiciones de alta concentración de aluminio.

El comportamiento (Cuadro 6) de los híbridos disponibles actualmente, hechos con las mejores fuentes de tolerancia a la toxicidad de aluminio, demuestra que no es posible usar estas fuentes per se en un programa de fitomejoramiento. En general, estos híbridos son tardíos, altos, susceptibles al acame, y relativamente improductivos.

Cuadro 6. Comportamiento promedio de los híbridos de tres líneas hembra* y de siete líneas macho tolerantes al aluminio, en un latosol rojo oscuro de la fase Cerrado, en el CNPMS/EMBRAPA, Sete Lagoas, MG, Brasil.

Padre masculino del híbrido y testigos	Días a floración	Altura de planta (cm)	Rendimiento de grano (t/ha)
SC 048	69.3	137	1.80
SC 418	69.3	137	1.81
SC 112-14	69.0	141	1.94
3 DX 57/1/1/910 ^b	84.6	186	3.19
V 20-1-1-1 ^c	87.3	189	2.98
156 P-5-Serere-1 ^b	86.3	184	2.67
5 DX 61/6/2 ^c	85.7	186	2.66
Híbridos testigo sensibles al aluminio ^c	72.3	106	1.06
Línea SC 283	68.0	119	2.03
Línea SC 112-14	82.0	72	0.78

a. BR 007A (derivado del Redbine), Wheatland A y Redlan A.

b. Susceptible al acame.

c. EMBRAPA BR 300, Agroceres AG 1003 y Pioneer B 815.

FUENTE: Borgonovi, R. A. et al. Información sin publicar.

Resultados Preliminares de los Estudios sobre Herencia de la Tolerancia al Aluminio

En la literatura sólo se encuentran unos pocos estudios sobre la herencia de la tolerancia del aluminio en el sorgo (Pitta et al., 1979a; Furlani, 1981; Bastos, 1981; Bastos, 1982). Los resultados preliminares de Pitta et al. (1979a) sobre la evaluación de dos líneas hembra (BR 007 y Wheatland), de tres líneas macho (TX 2536, SC 112-14 y TAM 428), y de sus híbridos bajo condiciones de campo, sugieren la presencia de un pequeño número de genes con efecto dominante sobre el control de la

tolerancia al aluminio. De acuerdo con Furlani (1981), el tipo de comportamiento genético involucrado en la tolerancia al aluminio varía dependiendo del germoplasma utilizado tanto como de la concentración de aluminio en la solución nutritiva. El autor también mostró que con una concentración de aluminio de 43 $\mu\text{mol/l}$ (1.2 ppm) se pueden identificar muy pocos genotipos como sensibles al aluminio. Sin embargo, con una concentración de 96 $\mu\text{mol/l}$ de aluminio, los genotipos clasificados anteriormente como tolerantes al Al, SC 283 y SC 112-14, confirmaron su comportamiento. Este autor consideró que la herencia de la tolerancia al aluminio en el sorgo era compleja.

Bastos (1981) evaluó la longitud radicular de las líneas y de sus híbridos F_1 en una solución nutritiva sin ningún aluminio y con 154 $\mu\text{mol/l}$ (4 ppm) de aluminio, y concluyó que el control genético de la tolerancia era complejo. Más tarde, en 1982, este autor utilizó cinco cruces F_1 que contenían dos líneas consideradas tolerantes (SC 175-15 y SC 237-14) y dos líneas sensibles (TX 415 y 7B113) y la segregación transgresiva de las poblaciones F_2 de estos cruces para mostrar que había, probablemente, diversos genes involucrados en la tolerancia al aluminio. El autor sugirió que había tres o más pares de genes involucrados en el control de la tolerancia al aluminio.

Resultados preliminares de Borgonovi et al.² indican diferencias entre los híbridos obtenidos con la línea tolerante al aluminio SC 283 y con varias líneas femeninas susceptibles (Cuadro 7). El crecimiento relativo de la raíz seminal de los híbridos hechos con las líneas hembras Wheatland A, CMS XS 168A y Redlan A fue superior que el CRSR de los híbridos hechos con las líneas femeninas TX 623A y BR 007 A. Existe un efecto aparente de habilidad combinatoria específica para la tolerancia al aluminio, lo que indica que la herencia de esta característica puede ser compleja. En el CNPMS hay varios estudios en este momento que involucran diversas líneas sensibles y tolerantes, sus híbridos F_3 y F_2 , y los respectivos retrocruces, que deben ayudar a clarificar los patrones de herencia para esta característica.

En general, parece razonable asumir que hay pocos genes principales con una tendencia dominante y varios genes de efectos menores con algún efecto aditivo, por lo menos, involucrados en el control genético de la tolerancia al aluminio. Los genes mayores con alguna dominancia se pueden explorar y transferir

2. Información sin publicar.

Cuadro 7. Crecimiento radicular seminal relativo (CRSR) de líneas de sorgo y de sus híbridos en solución nutritiva con 4.8 ppm de aluminio. CNPMS/EMBRAPA, Sete Lagoas, MG, Brasil.

Identificación	CRSR (%)
SC 283	34.2
TX 623 A	5.8
TX 623 A x SC 283	10.8
BR 007 A	5.1
BR 007 A x SC 283	10.1
Wheatland A	3.3
Wheatland A x SC 283	21.7
Redlan A	5.0
Redlan A x SC 283	17.4
CMS XS 168 A	4.8
CMS XS 168 A x SC 283	24.0

FUENTE: Borgonovi, R. A. et al. Información sin publicar.

al germoplasma seleccionado para su uso inmediato. Mientras tanto, parece que la metodología de mejoramiento de las poblaciones parece ser la más adecuada, a largo plazo, para explotar todos los genes deseables que controlan la herencia de la tolerancia al aluminio.

Desarrollo de Cultivares Seleccionados Tolerantes al Aluminio

El desarrollo de cultivares tolerantes al complejo de suelos del Cerrado en el CNPMS se ha basado en los métodos empleados tradicionalmente en el mejoramiento del sorgo. Básicamente, se ha adoptado la siguiente metodología:

Introducción y evaluación del germoplasma por su tolerancia a la toxicidad del aluminio

El programa de mejoramiento del CNPMS ha estado trabajando cada vez más con la introducción y evaluación de germoplasma porque solamente una pequeña porción de la colección mundial se ha evaluado efectivamente para buscar su tolerancia al aluminio. Este programa cuenta con la colaboración de investigadores del Instituto Agronómico de São Paulo, en Campinas, en asociación con otros proyectos del Programa Nacional de Investigación de Sorgo, de EMBRAPA. El CNPMS ha utilizado técnicas de selección de campo en Sete Lagoas, Brasil, complementadas con técnicas de solución nutritiva, tanto en Sete Lagoas como

en Campinas. Las mejores líneas identificadas hasta el presente están en el Cuadro 5.

Trasferencia de genes tolerantes al aluminio de líneas exóticas a líneas seleccionadas

La transferencia de los genes mayores, identificados en las líneas exóticas (por ejemplo SC 283), a las líneas de mejoramiento seleccionadas del programa del CNPMS, y el desarrollo de nuevos cultivares con tolerancia al aluminio se ha realizado mediante selección en solución nutritiva en el invernadero, en la que se identifican las plantas tolerantes dentro de las familias segregantes. Utilizamos una metodología de mejoramiento de 'línea rápida' para incorporar los genes de efectos mayores en nuestras líneas seleccionadas B y R; se prestará, en una segunda etapa, más atención a los genes modificadores.

Metodología de mejoramiento de poblaciones

Utilizando las mejores líneas seleccionadas y las mejores líneas exóticas tolerantes al aluminio del programa de mejoramiento del CNPMS, se ha desarrollado una población de entrecruzamiento aleatorio usando el gene de esterilidad masculina ms_3 . Esta población, BRP5BR (Cuadro 8), tiene tres ciclos de entrecruzamiento aleatorio y está sembrada actualmente para seleccionar plantas S_0 . El siguiente procedimiento de selección se utilizará en cada ciclo:

1. Selección de plantas S_0 en un suelo uniforme del Cerrado (1000 plantas S_0).
2. Selección de progenies S_1 en solución nutritiva para identificar del 40% al 50% de las progenies superiores.
3. Evaluación de aproximadamente 400 progenies S_2 del paso 2, en un suelo uniforme del Cerrado con 40% a 50% de saturación de aluminio.
4. Recombinación del mejor 20% (semilla de las progenies remanentes S_1) de las progenies S_2 ; aproximadamente 40 familias.

Este procedimiento de selección debe concentrar efectivamente tanto los genes de efecto principal como los genes modificadores de efectos menores, y aumentar el grado de tolerancia al complejo de suelos del Cerrado.

Cuadro 8. Líneas de sorgo utilizadas para sintetizar, por su tolerancia al aluminio, las poblaciones de entrecruzamiento al azar (BRP5BR).

Identificación	Origen
IS 12564 C (SC 048)	Sudán
IS 12612 C (SC 112-14)	Etiopía
IS 12666 C (SC 175-14)	Etiopía
IS 7173 C (SC 283)	Tanzania
IS 1309 C (SC 322)	Tanzania
IS 1335 C (SC 418)	Tanzania
156-P-5-Serere-1	Uganda
IS 3758 C (SC 326-6)	Etiopía
TX 2536	E.U.

FUENTE: Borgonovi et al., 1982.

Resumen y Conclusiones

Hay, aparentemente, una gran cantidad de variación genética en la tolerancia del sorgo al complejo de suelos del Cerrado. Es necesario además evaluar sistemáticamente una mayor porción de la colección mundial de sorgo para identificar fuentes adicionales de tolerancia al aluminio. La herencia de esta tolerancia parece muy compleja y necesita estudios más detallados. Se puede hacer algún progreso rápido en la tolerancia al aluminio utilizando fuentes como la SC 283, la cual tiene probablemente genes mayores.

Se debe desarrollar un programa internacional de investigación cooperativa que involucre el INTSORMIL y el ICRISAT, además de los programas existentes en Brasil (CNPMS, IAC, IPA), para identificar las regiones de Africa con alta saturación de aluminio y las fuentes de germoplasma de estas regiones, e intercambiar germoplasma para los programas nacionales.

Se debe emplear una metodología de investigación interdisciplinaria que involucre mejoradores, fisiólogos, edafólogos y economistas, para desarrollar la tecnología y los sistemas de producción para la explotación racional de los cerrados y suelos similares. Este 'equipo' interdisciplinario necesita desarrollar o mejorar las técnicas de selección para las interacciones complejas que ocurren en el Cerrado y en tipos de suelo similares.

Referencias

- Alves, E. R. de A. 1983. Brazilian agricultural policy dilemma: Expansion of productivity or area. EMBRAPA and Drainage and Irrigation Department (DID). Brasilia, Brasil.
- Bastos, C. R. 1981. Toxicity of aluminum in nutrient solution to sorghum seedlings. Tesis (M.S.). Mississippi State University, Mississippi State, MS, E.U.
- . 1982. Inheritance study of aluminum tolerance in sorghum in nutrient culture. Tesis (Ph.D.). Mississippi State University, Mississippi State, MS, E.U.
- Borgonovi, R. A.; Santos, F. G. y Schaffert, R. E. 1982. Population breeding in sorghum; 1: Development of BRP5BR with tolerance to aluminum toxicity. En: Annual 14th Brazilian Maize and Sorghum Rev. EMPASC, Florianopolis, SC, Brasil. 34 p.
- Brown, J. C. 1979. Genetic improvement and nutrient uptake in plants. *Bio-Science* 29:289-292.
- y Jones, W. E. 1977. Fitting plants nutritionally to soils; 3: Sorghum. *Agron. J.* 69:411-414.
- Clark, R. B. 1975. Report for mineral nutrition in corn and sorghum; consulting report prepared for the staff of the National Corn and Sorghum Research Center, EMBRAPA. Sete Lagoas, MG, Brazil.
- y Brown, J. C. 1980. Role of the plant in mineral nutrition as related to breeding and genetics. En: American Society of Agronomy and Soil Science Society of America (eds.). *Moving up the yield curve: Advances and obstacles.* p. 45-70.
- dos Santos, H. L.; Baligar, V. C. y Vasconcellos, C. A. 1980. Screening sorghum genotypes for aluminum tolerance. En: Annual 13th Brazilian Maize and Sorghum Rev. IAPAR, Londrina, Paraná, Brasil. 24 p.
- Duncan, R. R. 1981a. Variability among sorghum genotypes for uptake of elements under acid field conditions. *J. Plant Nutr.* 4(1):21-32.
- . 1981b. Genetic variation in the uptake of critical elements for sorghum lines grown on an acid soil in Georgia. 12th Biennial Grain Sorghum Research and Utilization Conference, febrero 1981. Lubbock, TX, E.U.
- EMBRAPA (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária). 1978. CPAC Annual Report for 1976-77. Centro de Pesquisa Agropecuária dos Cerrados (CPAC), Planaltina, DF, Brasil. 183 p.

- . 1979. Results of the National Grain Sorghum Trials, 1975-76 and 1976-77. Centro Nacional de Pesquisa de Milho e Sorgo (CNPMS), Sete Lagoas, MG, Brasil.
- EMGOPA (Empresa Goiana de Pesquisa Agropecuária). 1978. Annual Report for 1977-78. Goiânia, GO, Brasil. 164 p.
- . 1979. Annual Report for 1978-79. Goiânia, GO, Brasil. 237 p.
- . 1980. Annual Report for 1979-80. Goiânia, GO, Brasil. 306 p.
- . 1981. Annual Report for 1980-81. Goiânia, GO, Brasil. 246 p.
- EPAMIG (Empresa de Pesquisa Agropecuária de Minas Gerais). 1979. Sorgho: Uma nova opção para a agricultura. Inf. Agrop. (Belo Horizonte) 56:1-92.
- . 1984. Annual Report. Belo Horizonte, MG, Brasil.
- Epstein, E. 1976. Adaptation of crops to salinity. En: Wright, M. J. (ed.). Plant adaptation to mineral stress in problem soils. Cornell University, Agric. Exp. Sta., Ithaca, NY, E.U. p. 73-85.
- Fernandes, F. T. y Schaffert, R. E. 1980. Sorghum in Brasil. En: ICRISAT. Proceedings of the international workshop on sorghum diseases, Hyderabad, India, 1978. Hyderabad. p. 15-17.
- Ferri, M. G. 1977. Ecology of the Cerrado. En: Ferri, M. G. (ed.). Fourth Cerrado workshop; bases for agricultural utilization. Universidade de São Paulo, Ed. Itatiaia, Belo Horizonte, MG, Brasil p. 15-33.
- Foy, C. D. 1974. Effects of aluminum on plant growth. En: Carson, E. W. (ed.). The plant roots and its environment. University Press Virginia, Charlottesville, VA, E.U. p. 601-542.
- ; Chaney, R. L. y White, M. C. 1978. The physiology of metal toxicity in plants. Ann. Rev. Plant Physiol. 19:511-566.
- y Fleming, A. L. 1978. The physiology of plant tolerance to excess available aluminum and manganese in acid soils. En: Jung, G. A. (ed.). Crop tolerance to suboptimal land conditions. American Society of Agronomy, Madison, Wisconsin, E.U. p. 301-328.
- Furlani, P. R. 1979. Screening sorghum for aluminum tolerance. Tesis (M.S.). University of Nebraska, Lincoln, NB, E.U.
- . 1981. Effects of aluminum on growth and mineral nutrition of sorghum genotypes. Tesis (Ph.D.). University of Nebraska, Lincoln, NB, E.U.
- y Clark, R. B. 1981. Screening sorghum for aluminum tolerance in nutrient solutions. Agron. J. 73:587-594.

- Goedert, W. J.; Lobato, E. y Wagner, E. 1980. Agricultural potential of Brazilian Cerrado. *Pesq. Agropec. Bras.* 15:1-17.
- Konzak, C. F.; Polle, E. y Kittrick, J. A. 1976. Screening several crops for aluminum tolerance. En: Wright, M. J. (ed.). *Plant adaptation to mineral stress in problem soil.* Cornell University. Agric. Exp. Sta., Ithaca, NY, E.U. p. 311-327.
- Lopes, A. S. 1983. "Cerrado" soils: Characteristics, properties and management. International Potash and Phosphate Institute, Piracicaba, SP, Brasil.
- y Cox, F. R. 1977. A survey of the fertility status of surface soils under "Cerrado" vegetation in Brazil. *Soil Sci. Am. J.* 41:743-747.
- Magnavaca, R. 1982. Genetic variability and the inheritance of aluminum tolerance in maize (*Zea mays* L.). Tesis (Ph.D.). University of Nebraska, Lincoln, NB, E.U.
- Malavolta, E.; Nogueira, F. D.; Oliveira, I. P.; Nakayama, L. y Eimori, I. 1981. Aluminum tolerance in sorghum and bean; methods and results. *J. Plant Nutr.* 3:687-694.
- Pitta, G. V. E.; Trevisan, W. L.; Schaffert, R. E.; de Frana, G. E. y Bahia Filho, A. F. C. 1976. Evaluation of sorghum lines under high acidity conditions. En: *Annual 11th Brazilian Maize and Sorghum Rev.* Escola Superior de Agricultura de Lavras (ESAL), Piracicaba, São Paulo, Brasil. p. 553-557.
- ; Schaffert, R. E. y Borgonovi, R. A. 1979a. Evaluation of sorghum parents and hybrids to high soil acidity conditions. En: *Proc. 12th Brazilian Maize and Sorghum Rev.* Empresa Goiana de Pesquisa Agropecuária (EMGOPA), Goiânia, GO, Brasil. p. 127.
- ; Vasconcellos, C. A.; Bahia Filho, A. F. C. y Oliveira, A. C. 1979b. Evaluation of sorghum lines to high soil acidity conditions; II. En: *Proc. 12th Brazilian Corn and Sorghum Research Conference.* Goiânia, GO, Brasil. p. 128.
- Salinas, J. G.; Gonzáles, E.; Kamprath, E. J.; Sánchez, P. A. y Soares, W. V. 1976. Residual effects of lime rates and depth of incorporation. En: *Agronomic-economic research on soils of the tropics; annual report for 1975-76.* North Carolina State University, Raleigh, NC, E.U. p. 16-26.
- y Sánchez, P. A. 1978. Tolerance to Al toxicity and low available P. En: *Agronomic-economic research on soils of the tropics; annual report for 1976-77.* North Carolina State University, Raleigh, NC, E.U. p. 115-137.

- Sánchez, P. A.; Lopes, A. S. y Buol, S. W. 1974. Cerrado Research Center: preliminary project proposal. Raleigh, NC, E.U. (Mimeografiado.)
- Schaffert, E. R.; McCrate, A. J.; Trevisan, W. L.; Bueno, A.; Meira, J. L. y Rhykerd, C. L. 1975. Genetic variation in *Sorghum bicolor* (L.) Moench for tolerance to high levels of exchangeable aluminum in acid soils of Brazil. En: Proceedings of Sorghum Workshop. University of Puerto Rico, Mayagüez, Puerto Rico. p. 151-160.
- Wolf, J. M. 1977. Probabilities of wet season dry spells for Brasilia, DE. Pesq. Agrop. Bras. 12:141-150.

Búsqueda y Uso del Germoplasma Exótico de Sorgo Tolerante al Aluminio

Lynn M. Gourley*

Introducción

Hoy en día, las fronteras de la agricultura son las tierras marginales y subutilizadas del trópico. No ha sido posible aplicar con éxito las prácticas de la agricultura tradicional en estas zonas por limitantes tales como falta de acceso al capital, sistemas inadecuados de transporte y mercadeo, sistemas de riego insuficientes, y el costo alto y desigual del suministro de los productos requeridos por los agricultores de bajos recursos. Los mayores inconvenientes de producción en las sabanas tropicales de América del Sur son los suelos de bajo pH con cantidades inadecuadas de N, P, Ca, Mg y elementos microesenciales, con niveles tóxicos de Al soluble, y varios otros factores ambientales como insectos, enfermedades, y distribución desuniforme de lluvia. Las agencias nacionales de investigación en América Latina y en otros lugares del mundo están desarrollando tecnologías de producción de bajo costo, que contribuyan a reducir los déficits de grano para alimentación humana y animal.

La distribución de suelos en el trópico entre los 23° N y los 23° S se presenta en el Cuadro 1 (Sánchez y Salinas, 1981). En América tropical hay más de un billón de hectáreas de suelos ácidos e infértiles. Esta vasta área está dominada por Oxisoles y Ultisoles en las regiones de las sabanas de los Llanos de Colombia y Venezuela, los Cerrados del Brasil y gran parte de la Amazonia (Cuadro 2). Las restricciones de estos suelos son más de origen químico que físico (Cuadro 3). Cerca del 75% de las áreas improductivas tienen niveles de saturación de Al que son tóxicos para la mayoría de los cultivos de grano. Asociada con el alto contenido de Al, se añade otra limitante: muy bajas cantidades de Ca intercambiable y alta fijación de P (Reeve y Summer, 1970).

* Profesor de agronomía en la Universidad Estatal de Mississippi, E.U. Asignado al CIAT, Cali, Colombia.

Cuadro 1. Distribución de categorías de suelos en los trópicos.*

Categoría del suelo	Extensión (millones ha) en:				Extensión de tierra de los trópicos (%)
	Américas	Africa	Asia	Total	
Oxisoles	502	316	15	833	23
Ultisoles	320	135	286	741	20
Inceptisoles	204	156	169	529	14
Otros	467	536	340	1343	43
Total	1493	1143	810	3446	100

a. Generalmente incluye las áreas entre las latitudes 23°N y 23°S.

FUENTE: Sánchez y Salinas, 1981.

Cuando los problemas de origen químico, en la producción de cultivos, son eliminados por medio de aplicaciones de Ca y fertilización, estos suelos pueden contarse entre los más productivos del mundo. Sin embargo, el costo de cal requerida para reducir la acidez del suelo y permitir alto rendimiento de producción, generalmente sobrepasa los recursos disponibles del agricultor. No obstante, la aplicación de cal en la superficie del suelo hace poco para corregir los impedimentos químicos que encuentra en el subsuelo la penetración radicular. Como consecuencia, el rendimiento de la cosecha se reduce durante los períodos de sequía, puesto que la lluvia o el riego son insuficientes para surtir de agua la superficie abonada con cal cuando el nivel de humedad del suelo baja al punto de marchitamiento permanente.

Una alternativa más viable para el problema de la toxicidad de Al es la del mejoramiento genético que selecciona plantas más tolerantes a las limitaciones de los suelos ácidos. Investigaciones llevadas a cabo en el Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT) han demostrado que varias especies de pastos introducidas de las sabanas de suelos ácidos de Africa y de Brasil se desarrollan bien en los Llanos Orientales de Colombia, con una mínima enmienda del suelo (CIAT, 1983). Recientemente, los países del Pacto Andino y Brasil han mostrado interés en aumentar la producción de sorgo en América Latina, especialmente para producir concentrados para aves (Cuadro 4).

Se ha sugerido que la introducción de ecotipos de sorgo desde Africa —el centro de origen del sorgo donde más de 50% de las tierras tropicales tienen suelos ácidos— podría proveer germoplasma tolerante al Al para usarlo en América tropical (Dogget, 1970).

Cuadro 2. Distribución de Oxisoles y Ultisoles por país en América Latina y el Caribe.

País	Area (millones ha)	Fracción del país (%)
América del Sur		
Brasil	572.71	68
Colombia	67.45	57
Perú	56.01	44
Venezuela	51.64	58
Bolivia	39.54	57
Guyana	12.25	62
Surinam	11.43	62
Paraguay	9.55	24
Ecuador	8.61	23
Guayana Francesa	8.61	94
Chile	1.37	2
Argentina	1.28	0 ^a
Total	840.45	48
América Central		
México	4.42	2
Panamá	3.59	63
Honduras	3.13	29
Nicaragua	2.92	30
Guatemala	0.96	9
Costa Rica	0.70	14
Belice	0.40	18
Total	16.12	6
Región del Caribe		
Cuba	2.42	21
Haití	0.52	19
Jamaica	0.45	41
Trinidad y Tobago	0.42	84
República Dominicana	0.42	9
Puerto Rico	0.16	18
Guadalupe	0.09	47
Martinica	0.05	43
Total	4.53	21
Gran total	861.10	42

a. El porcentaje real es 0.4.

FUENTE: Cochrane, 1978.

Cuadro 3. Características de dos categorías de suelos tropicales.^a

Categoría del suelo	Prof. (cm)	Arcilla (%)	M.O. (%)	P (ppm)	pH	Cationes intercambiables (meq/100 g)				CIC efectiva	Sat. Al (%)
						Al	Ca	Mg	K		
Ultisol											
	0-20	71	7.1	1.8	4.1	2.7	.65	.49	.36	4.21	64
	20-35	77	4.0	1.1	4.0	2.7	.31	.04	.13	3.25	83
	35-62	84	1.9	0.9	4.3	3.2	.24	.02	.09	3.65	88
	62-91	88	0.7	0.9	4.4	1.1	.15	.02	.06	1.43	77
	91-105	89	1.5	1.2	4.4	2.0	.22	.01	.04	2.34	85
Oxisol											
	0-12	38	4.0	1.0	4.5	3.8	.20	.20	.10	4.40	86
	12-32	41	2.0	1.0	4.6	2.8	.10	.10	.10	3.10	89
	32-58	43	1.7	Trazas	4.8	2.1	.10	.10	.10	2.30	91
	58-88	45	0.9	Trazas	5.2	0.7	.10	.10	.10	0.90	78
	88-148	45	0.6	Trazas	5.1	0.6	.10	.10	.10	0.80	75

a. Prof. = profundidad; M.O. = materia orgánica; Sat. = saturación. Características del Ultisol de la subestación CIAT-Quilichau; características del Oxisol de una sabana bien drenada, subestación CIAT/ICA Carimagua. Los métodos de extracción o de determinación son: para el P, Bray II (pH de 1:1 suelo: agua); para los cationes de intercambio, la sal neutra obtenida en 100 g de suelo; para la CIC efectiva, la suma de los cationes de intercambio; y para la saturación de Al, el Al intercambiable dividido por la CIC efectiva y multiplicado por 100. Los datos del cuadro son del CIAT.

Cuadro 4. Cambios en algunos productos en los países de JUNAC y de Brasil durante los períodos de 1974-1976 y 1980-1982.*

Producto	Crecimiento por año (%) de:		
	Area sembrada o animales	Rendimiento	Producción
Trigo	- 2.1	- 0.3	- 2.4
Maíz	1.1	2.4	3.7
Arroz de riego	2.0	0.9	6.0
Sorgo	13.0	- 1.9	9.6
Res	0.9	-	1.6
Cerdo	4.0	-	4.5
Pollo	7.4	-	19.1

a. Los países del Pacto Andino son Bolivia, Colombia, Ecuador, Perú y Venezuela.
JUNAC = Junta del Acuerdo de Cartagena.

FUENTE: FAO, 1983.

El propósito de este trabajo es describir un método sistemático para la selección e identificación de cultivares de sorgo de la colección mundial que sean tolerantes al medio de los suelos ácidos de América tropical, y de presentar la estrategia de fitomejoramiento para los suelos ácidos tropicales del Programa Internacional de Sorgo y Millo (INTSORMIL) del Título XII de los Estados Unidos.

Evaluación de la Tolerancia al Al

Un resumen de la literatura sobre los diferentes métodos usados para la selección de plantas por su tolerancia a la toxicidad del Al está más allá del propósito de este trabajo. Sin embargo, se darán algunos ejemplos para ayudar a explicar la racionalidad del sistema que se recomienda aquí para el sorgo.

Evaluaciones anteriores exitosas sobre la tolerancia del sorgo a los efectos tóxicos del Al fueron llevadas a cabo en ensayos de campo en los suelos ácidos de los Cerrados, en Brasil (Schaffert et al., 1975; Pitta et al., 1976). Los miembros del programa nacional de Brasil, Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA), seleccionaron germoplasma de sorgo enviado a ellos por Doggett desde Uganda, así como líneas convertidas del programa de la Universidad de Texas A&M y del USDA. Por falta de disponibilidad de germoplasma, menos del 1% del sorgo mundial ha sido seleccionado en América Latina por su tolerancia al Al.

Antes de su viaje a Colombia, el autor y algunos de sus estudiantes de la Universidad Estatal de Mississippi usaron una modificación (aumento de la concentración de Al y reducción de la de P) de una técnica del cultivo nutritivo empleado para seleccionar plántulas de sorgo por su tolerancia al Al (Bastos y Gourley, 1982), que fue desarrollada por Clark y sus estudiantes de la Universidad de Nebraska (Furlani y Clark, 1981). El coeficiente de correlación obtenido en Colombia cuando se validó en el campo un gran número de genotipos tolerantes al Al fue positivo. Sin embargo, menos de la mitad de la variabilidad pudo ser explicada por la asociación entre el crecimiento relativo de la raíz primaria usando la técnica del cultivo nutritivo y la clasificación de tolerancia al Al bajo las condiciones de campo.¹ Investigadores de Brasil han reportado hallazgos similares en que había coeficientes de determinación del 51% o menos (dos Santos et al., 1980).

Usando líneas puras de sorgo seleccionadas a partir de los ensayos culturales de nutrimentos y sus híbridos F₁, Bastos (1981) encontró que una porción significativa de la varianza en la tolerancia al Al era debida al control genético, de acuerdo con los resultados en un estudio de dos dialelos. Tanto la habilidad combinatoria general (HCG) como la habilidad combinatoria específica (HCE) contribuyeron significativamente ($P \leq 0.01$) a la variación genética de los dos dialelos. Más aún, la variación de HCG explicó la mayor parte de la variación genética, y los efectos de HCG en los padres fueron consistentes con la clasificación de la tolerancia al Al. Sin embargo, continuando el estudio de los cruces dialélicos de tolerancia x tolerancia y de tolerancia x susceptibilidad en las generaciones segregantes, Bastos (1982) no encontró ninguna ganancia genética al seleccionar el 10% superior de 700 plántulas de cada una de las cinco poblaciones F₂ y de su progenie F₃ usando el método de evaluación del cultivo nutritivo.

Una técnica de selección en invernadero fue desarrollada en el CIAT usando un suelo Oxisol virgen de los Llanos Orientales de Colombia con diferentes niveles de saturación de Al (Gourley, 1983). Se obtuvieron tres niveles de saturación de Al (86%, 60% y 45%) aplicando diferentes niveles de cal. Cuatro plantas de sorgo fueron sembradas por materia y cultivadas en esta tierra durante un período de tres semanas. La mejor separación de genotipos se produjo en el nivel intermedio de 60% de saturación

1. Gourley, L. Información sin publicar.

de Al. Sin embargo, el rendimiento de materia seca de las raíces, de la parte aérea de la planta, y el de toda la planta, al igual que las evaluaciones visuales, no correlacionaron lo suficientemente bien con los pesos secos de la parte aérea de las plantas cultivadas en el campo al momento de la antesis. Por esta razón, no se continuó usando esta técnica en el programa de mejoramiento.

A causa de una falta de confianza en las llamadas 'pruebas rápidas' de la tolerancia al Al, se desarrolló una técnica de selección en el campo. El procedimiento fue diseñado para medir la tolerancia al Al y no medir, en cuanto fuera posible, el efecto del P o la interacción Al x P. El objetivo era establecer un nivel de toxicidad por Al que fuera suficientemente alto para eliminar con él los genotipos susceptibles, pero que no fuera tan alto como para evitar que los genotipos tolerantes produjeran un rendimiento razonable de grano. Para alcanzar este objetivo, fue seleccionado un nivel de saturación de Al de 60% a 70%.

Este alto nivel de saturación de Al se explica por varias razones. En la selección inicial de 3000 entradas de la colección mundial, sólo los genotipos más tolerantes eran deseados para propósitos de evaluación ulterior o de mejoramiento. Un severo estrés de toxicidad de Al fue aplicado con el fin de reducir rápidamente el número de genotipos eliminando así las líneas con bajos a moderados niveles de tolerancia al Al y las que escapan al tratamiento. Para tener un potencial económico, los genotipos con los niveles más altos de tolerancia al Al permitirían a los agricultores de pocos recursos utilizar una cantidad mínima de cal para obtener una producción comercial. Ya que generalmente sólo la capa superficial del suelo se ha modificado mediante correctores, las raíces de los genotipos con los más altos niveles de tolerancia al Al no estarían completamente inhibidas para penetrar al nivel más alto de saturación de Al encontrado en el subsuelo. Observaciones de campo muestran que con un nivel de saturación de Al de 60% a 70% se logrará el objetivo antes mencionado.

El Cuadro 5 contiene una lista de los resultados de análisis de suelos de un Ultisol virgen bajo pastos permanentes (Quilichao, Colombia) antes y después de la incorporación de enmiendas al suelo. Las aplicaciones a voleo fueron efectuadas e incorporadas en los 20 cm superiores del suelo en las siguientes cantidades, por hectárea: 500 kg de cal dolomítica, 1000 kg de fertilizante comercial 10-30-10, 5 kg de zinc y 1 kg de boro. La saturación de Al fue reducida de 80% a 63%, pero el pH

Cuadro 5. Características de la capa superficial de un Ultisol virgen antes y después de la aplicación de 500 kg/ha de cal dolomítica y 1000 kg/ha de fertilizante 10-30-10, en CIAT-Quilichao, Colombia.

Características del suelo	Antes de la enmienda	Después de la enmienda
pH (H ₂ O)	4.5	4.4
P (ppm)	2.3	17.9
Ca (meq/100 g)	0.68	1.24
Mg (meq/100 g)	0.18	0.52
Al (meq/100 g)	3.9	3.4
CIC efectiva (meq/100 g)	4 .91	
Saturación de Al (%)	80.4	63.0

permaneció igual. Las cantidades de enmiendas necesarias para adquirir condiciones similares en otros suelos dependerán de muchos factores, así que se recomienda que el fitomejorador trabaje conjuntamente con un especialista en suelos quien estará familiarizado con las características químicas del suelo en cuestión.

La siguiente escala de evaluación visual fue utilizada para calificar los genotipos del sorgo exótico:

- 1 = Buen color de la planta, panículas llenas, pocos síntomas de estrés o de toxicidad por Al.
- 2 = Algún amarillamiento de las hojas, tamaño reducido de la panícula, síntomas de algún estrés y síntomas de toxicidad por Al.
- 3 = Plantas atrofiadas, hojas amarillentas y secas, panículas pequeñas con poco grano, muchos síntomas de estrés.
- 4 = Plantas severamente atrofiadas o muertas, dos a tres semanas después de la emergencia.

Observaciones de Campo

Las evaluaciones de campo son menos controladas por el investigador que aquéllas que son llevadas a cabo en el laboratorio. Por lo tanto, las relaciones de causa y efecto de la observación final o del resultado deben ser obtenidas, en muchas ocasiones, por deducción o deben esperar un estudio ulterior. Este parece ser el caso de las evaluaciones de campo del sorgo en el complejo

del suelo ácido tropical'. Varios de estos factores se discuten en los párrafos siguientes.

Aluminio. La tolerancia al Al es, por supuesto, el principal factor en el procedimiento de selección. Sin un nivel bastante alto de Al en los medios de prueba, un genotipo susceptible con un nivel poco práctico de tolerancia al Al podría ser seleccionado, y la medición de cualquier otro factor genético o agronómico quedaría cancelada. El porcentaje de saturación de Al en los 20 cm superiores de la capa superficial del suelo puede ser alterado hasta el nivel deseado con un grado relativamente alto de precisión. Este nivel es bastante estable durante unos cuantos años. La experiencia ha demostrado que la mayoría de los genotipos de sorgo parecen tolerar niveles de saturación de Al de 20% sufriendo poca reducción en su rendimiento. De los genotipos evaluados hasta la fecha, pocos toleran 80% de saturación de Al y éstos producen muy poco grano.

Fósforo. Aunque no se usará como variable en este procedimiento de selección, la asociación del P disponible y de la saturación de Al tiene que ser considerada. Algunos genotipos seleccionados mostraron el síntoma típico de hoja morada por deficiencia de P hasta cuatro semanas después de sembrados, aunque se había aplicado una dosis alta de 300 kg/ha de P_2O_5 en la preparación de la parcela del ensayo. Los suelos minerales fijan rápidamente los fosfatos agregados; por lo tanto, los fosfatos solubles agregados son recuperados sólo parcialmente por las plantas bajo condiciones óptimas. El alto contenido de óxidos hidratados de muchos de los suelos tropicales puede resultar en una enorme capacidad de fijación de fosfatos. La micorriza puede ayudar también a las plantas en la utilización del P. El sorgo se utiliza para mantener razas de hongos de micorriza para estudios en el invernadero, y la asociación de asimilación de micorriza y P está siendo aclarada. La variabilidad genética de la masa de raíces y la asociación de la micorriza podrían explicar posiblemente las aparentes diferencias de la absorción de P observadas en el campo.

Calcio y magnesio. Carbonatos de calcio y de magnesio en materiales encaladores reducen el nivel de saturación de Al cuando se aplican a suelos ácidos tropicales. En estos suelos lixiviados y con pocas bases, el Ca y el Mg son también importantes, a nivel de fertilizante, en la nutrición de la planta. El calcio es esencial para la elongación de la raíz ya que no es transportado a la punta de la raíz; la cantidad de Ca en algunos

subsuelos tropicales es insuficiente para el crecimiento radical. Ritchey et al. (1980) han mostrado que los iones de Ca de algunos compuestos, como CaSO_4 , CaCl_2 y $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$, se mueven hacia abajo en el perfil del suelo (hasta 100 cm en un año) en asociación con el anión. No ocurre así con el CaCO_3 . La concentración crítica de Ca para el crecimiento de las raíces de sorgo en estos suelos es desconocida. Sin embargo, sin un porcentaje suficiente de tolerancia al Al, la cuestión es académica.

Volumen de la raíz. La velocidad relativa de crecimiento de raíz y parte aérea de algún genotipo de sorgo afectará la clasificación visual, a nivel de campo, de su tolerancia al Al. Algunos genotipos tienen un crecimiento rápido de la parte superior de la planta en los primeros estados de desarrollo, mientras que otros parecen atrofiados y con estrés. Muchas de las líneas que tienen buen crecimiento de la parte aérea de la planta mueren antes o durante el período de llenado del grano, mientras que las líneas de crecimiento lento parecen recuperarse y dar un rendimiento de grano casi igual a su potencial genético en suelos con un nivel más bajo de saturación de Al. Este fenómeno parece deberse a la prioridad en la partición de los productos de la fotosíntesis durante las etapas de crecimiento de los diferentes genotipos. Aquellos genotipos tolerantes a altos niveles de Al distribuyen aparentemente una mayor porción de sus recursos fotosintéticos a las raíces en desarrollo. Los resultados de esta diferencia influirán en la clasificación visual de la tolerancia al Al en los diferentes estados de crecimiento de la planta. Ya que la producción de grano es la meta principal bajo las condiciones descritas, la clasificación visual, a nivel de campo, de la tolerancia al Al es de poco valor antes de que el genotipo alcance la madurez fisiológica.

Sequía. La sequía puede ser un impedimento para la producción en los suelos ácidos de las sabanas tropicales aun durante períodos favorables de lluvia. A pesar de tener un contenido de arcilla entre el 40% y el 70%, los Oxisoles y Ultisoles del trópico responden más como un suelo francoarenoso con respecto a la infiltración del agua. La estructura de agregados de estos suelos permite operaciones de campo pocas horas después de una lluvia; por tanto, la capacidad de retención de agua en el perfil de la superficie del suelo es reducida. Durante períodos cortos sin lluvia (los 'veránicos'), las plantas con sólo suficiente tolerancia al Al como para enraizar normalmente en la capa superficial fracasan frecuentemente a causa de la sequía. Por lo tanto, es importante tener un nivel de saturación de Al

suficientemente alto en la capa superficial del suelo para hacer una selección adecuada por tolerancia al Al, y utilizar riego sólo para 'salvar' la prueba de selección, es decir, para prevenir su pérdida.

Cuando las plantas se encuentran con follaje completo, el marchitamiento durante cortos períodos de sequía da una medida adicional del grado de tolerancia al Al. Aquellos genotipos que no se marchitan bajo radiación plena están obteniendo, sin duda, suficiente agua del subsuelo. Genotipos que se marchitan bajo estas condiciones no poseen la tolerancia al Al necesaria para que las raíces puedan penetrar al nivel más elevado de saturación de Al en el subsuelo. El volumen de las raíces y otros factores relacionados con la tolerancia a la sequía también influirán en las observaciones de tolerancia al Al.

Interacciones. La suma total de estos factores y su interacción afectará la clasificación visual de la tolerancia al Al. Desde un punto de vista práctico, el fitomejorador está observando en esta etapa de la investigación lo que un agricultor siempre mira, es decir, el resultado final. Calificaciones altas y consistentes de tolerancia al Al, bajo las condiciones indicadas en el proceso de selección, denotarán el grado más alto del rango de variabilidad genética para el 'complejo de tolerancia al Al' tomado como un todo.

En condiciones de saturación de Al del 63% en el ensayo de selección, bastantes genotipos mostraron un grado de tolerancia al Al entre moderado y alto. Sin embargo, la mayoría de estos genotipos no son agrónomicamente aceptables como variedades de sorgo para grano en su estado actual. El Cuadro 6 muestra las calificaciones, por país de origen, de los primeros 775 genotipos evaluados de la colección mundial. Las áreas de suelos ácidos de Kenia y Uganda tenían un porcentaje más alto de entradas en las categorías 1 y 2 que aquéllas evaluadas en los otros países registrados. El procedimiento de calificación fue diseñado para eliminar del 50% al 75% de los genotipos más pobres en las categorías 3 y 4. Parece que, para este propósito, un nivel de saturación de Al de 60% a 70% causa suficiente estrés a la planta. Entradas adicionales de la colección mundial se evaluarán continuamente. Las conclusiones finales concernientes a las mejores fuentes de germoplasma de Africa no se harán hasta que todos los 3000 genotipos seleccionados originalmente hayan sido investigados y evaluados.

Cuadro 6. Calificación de la tolerancia al Al de 775 líneas de la colección mundial, por país de origen.

País de origen	Líneas evaluadas (no.)	Líneas (%) con calificación ^a de:			
		1	2	3	4
Etiopía	158	13	21	37	29
Kenia	16	15	37	30	18
Nigeria	161	6	25	38	31
Tanzania	14	14	36	29	21
Uganda	104	14	48	22	16
Burkina Faso	82	4	36	32	28
Zaire	16	12	37	31	19
Otros	224	10	23	35	32
Total	775	11	31	32	26

a. 1 = tolerante al Al; 4 = susceptible al Al.

Algunos de los genotipos agronómicamente más deseables están siendo evaluados actualmente por su rendimiento. El Cuadro 7 muestra los resultados preliminares de rendimiento de un estudio de tasas de enclamiento llevado a cabo en Quilichao, Colombia. Después de ciertos experimentos adicionales, podrá recomendarse la liberación de algunos de estos genotipos para uso comercial. Algunos padres, al menos, han sido ya identificados para los programas de fitomejoramiento.

Estrategia de Mejoramiento

Los participantes del Foro de Investigación de Fitomejoramiento de 1983 señalaron cinco pasos necesarios para utilizar germoplasma exótico (Conservation and..., 1984). Estos pasos fueron: recolección, mantenimiento, evaluación, mejoramiento, y distribución. La estrategia de mejoramiento utilizada en este proyecto es paralela a la del foro. Los pasos seguidos en el programa de investigación de suelos ácidos de INTSORMIL son: selección de genotipos de la colección mundial de sorgo, incremento de su semilla en el trópico, evaluación de la tolerancia al Al bajo condiciones de campo, incorporación de la tolerancia al Al en las líneas e híbridos elites, y distribución de germoplasma superior a los programas nacionales y compañías comerciales de semillas.

El ICRISAT tiene un mandato mundial para investigar el mejoramiento del sorgo, el cual incluye la recolección y la

Cuadro 7. Resultados de los ensayos de rendimiento de grano llevados a cabo en CIAT-Quilichao, Colombia, en 1984, con sorgo cultivado en parcelas de campo aplicando cal a razón de 0.5, 1.5 y 4.0 t/ha.

Cultivar	Aplicando tasa de cal (t/ha) de:						
	0.5		1.5		4.0		
	Calific. visual ^a	Altura (m)	Rendimiento (t/ha)	Altura (m)	Rendimiento (t/ha)	Altura (m)	Rendimiento (t/ha)
IS2765	1.3	1.4	4.0	1.5	4.6	1.7	7.1
IS7132	1.0	1.4	4.3	1.3	4.9	1.5	6.9
IS7151	1.7	1.6	4.8	1.7	5.7	1.8	5.2
IS8577	1.3	1.4	5.0	1.5	6.2	1.7	5.7
IS8612	2.0	1.4	3.2	1.4	3.3	1.6	5.6
IS8860	2.0	1.9	3.1	2.0	3.6	2.3	5.4
IS8933	1.0	1.4	4.1	1.6	4.9	1.7	6.7
79SEPON8	2.7	1.2	2.3	1.5	3.2	1.6	6.3
79SEPON11	3.0	1.2	2.0	1.4	3.2	1.5	3.6
79SEPON54	2.0	1.0	3.8	1.2	3.7	1.3	5.0
M-91057-117	2.0	1.1	4.6	1.3	4.4	1.4	4.9
M-90378	3.0	1.0	2.9	1.3	3.1	1.2	3.2
(F3B55XF3B441)-1	2.0	.9	2.5	1.0	2.8	1.0	3.9
(F3B554XF3B441)-2	2.3	1.1	2.8	1.2	3.4	1.2	3.9
(GPR168XCS-170-6-17)-1-1	2.0	1.3	4.4	1.4	4.7	1.4	5.1
(IS12573CXSC108-3)7-3-5-1-1-1	1.7	1.2	4.4	1.2	4.5	1.2	5.5
3DX57/1/1/910	1.3	1.3	4.5	1.4	4.6	1.4	5.1
IS7173C	1.0	1.3	3.6	1.3	4.3	1.3	4.8
TX415	4.0	.6	.5	.6	1.2	.7	2.2
Promedio	2.0	1.2	3.5	1.4	4.0	1.4	5.1

a. 1 = tolerante al Al, 4 = susceptible al Al. Las calificaciones visuales de los cultivares en los ensayos de 1.5 y 4.0 t/ha fueron todas 1.0. Los niveles de saturación de aluminio para las aplicaciones de cal de 0.5, 1.5 y 4.0 t/ha fueron 63%, 45% y 32%, respectivamente.

conservación del germoplasma. La colección mundial de unas 22,000 líneas de sorgo es mantenida por el ICRISAT en Hyderabad, India. Más de 15,000 de estas líneas se encuentran en almacenamiento a largo plazo en el Laboratorio Nacional de Almacenamiento de Semillas de los Estados Unidos, en Fort Collins, Colorado. Unas 9000 líneas adicionales se encuentran en los Estados Unidos mantenidas por el USDA y otras agencias de investigación (Acheampong et al., 1984).

El primer paso para utilizar este germoplasma exótico fue una selección no aleatoria de aquellas líneas que tenían una probabilidad más alta de ser tolerantes al Al, y que eran obtenibles en el hemisferio occidental para evitar así demoras por cuarentena. En 1982, el autor en cooperación con John Axtell, un agrónomo de la Universidad de Purdue, desarrollaron un plan para seleccionar unas 3000 líneas de la parte de la colección mundial mantenida en Purdue. Usando mapas de clasificación de suelos de África para rastrear la localidad en donde ciertas líneas habían sido recolectadas originalmente, se seleccionaron sistemáticamente las líneas pertenecientes a las áreas con suelos ácidos. Se esperaba razonablemente encontrar en estas áreas tropicales la mayor diversidad genética de la tolerancia al Al.

Semillas de las primeras 1000 líneas fueron sembradas durante el invierno de 1982-1983 en el CIAT, en Cali, Colombia. Puesto que estas líneas eran mantenidas en almacenamiento a mediano plazo, fueron sembradas en suelos de pH y fertilidad óptimos. Es necesario incrementar la semilla de estas líneas exóticas en el trópico, ya que cerca del 60% de la colección mundial es sensitiva al fotoperíodo. De las plantas que produjeron semilla, se cosechó la semilla de diez panículas autopolinizadas de cada línea.

La evaluación por tolerancia al Al bajo condiciones de campo fue llevada a cabo como se describió anteriormente en este trabajo. La ventaja adicional de los ensayos de selección de campo sobre los métodos de laboratorio son las observaciones agronómicas que pueden obtenerse; ejemplos de éstas son: altura de la planta, número de días a la antesis, forma de la panícula, color de la semilla, y enfermedades foliares.

Partiendo de observaciones hechas en Colombia y de discusiones con científicos de EMBRAPA, parece que la herencia de la tolerancia al complejo de suelos ácidos tropicales depende de los padres utilizados en los diferentes estudios, y del grado de estrés por la toxicidad del Al. Algunas conclusiones generales

pueden hacerse: los híbridos son generalmente más tolerantes que cualquiera de las líneas progenitoras. Algunas líneas (por ejemplo, IS 7173C) parecen poseer uno o dos genes dominantes principales para la tolerancia al Al, mientras que otras, con niveles más moderados de tolerancia, producen una respuesta epistática en los híbridos. Esto parece indicar que varios genes están interactuando, pero que cada gen contribuye con menos de una respuesta mayor, tanto en el híbrido como en el padre. Cuando los cultivares TX 2536 o NB 9040 se usan como polinizadores de Wheatland, y siendo las tres líneas susceptibles a los niveles altos y moderados de toxicidad por Al, los híbridos serán bastante tolerantes. Cuando se consideran otros factores, además de la tolerancia al Al, en genotipos cultivados en el campo, no es sorprendente que se encuentren genes mayores, menores, modificadores, o genes que interactúan.

Estudios adicionales sobre herencia se están llevando a cabo para determinar si las fuentes de tolerancia al Al difieren y, si es así, ver si éstas pueden ser combinadas para producir líneas con mayores grados de tolerancia a ese elemento. Partiendo de las diferentes cantidades de Al presente en las hojas de las líneas tolerantes, parece probable que haya diferentes mecanismos de tolerancia.

Diversas formas de incorporar las mejores fuentes de tolerancia al Al a las líneas elite de sorgo se están empleando en el programa colombiano de mejoramiento adscrito a INTSORMIL. Genotipos exóticos, seleccionados con buena tolerancia al Al, se cruzan primero con un macho estéril o con una línea A estándar de Estados Unidos, y se observa la semilla producida en la panícula híbrida (la cual está cubierta con una bolsa polinizadora). Si no se produce semilla, esto indica que el exótico es un mantenedor o línea B; una panícula con llenado completo indica un restaurador o línea R. Genes para otras cualidades pueden ser determinados observando en el híbrido las interacciones de altura y madurez, el color de la semilla, las características de la panícula, la habilidad combinatoria para el rendimiento, etc. Si el híbrido se siembra en la parcela de selección, la presencia de genes dominantes mayores para la tolerancia al Al puede ser determinada por el alto grado de tolerancia a la toxicidad de Al.

Una vez que se haya determinado el estado de restaurador o de no restaurador del exótico, se desarrollan híbridos usando líneas elite que den la misma respuesta de un restaurador, de un restaurador x restaurador, y de un no-restaurador x no-restaurador.

A partir de aquí se sigue un programa general de mejoramiento usando el método de fitomejoramiento por pedigrí.

De las casi 100 líneas B liberadas de los programas de sorgo de Estados Unidos y de ICRISAT, sólo unas pocas indican algo de tolerancia a la toxicidad del Al bajo condiciones de campo. Por otro lado, varias líneas B exóticas del programa de conversión de sorgo de la Universidad de Texas A&M y del USDA producen un rango de tolerancia, siendo IS 7173C la mejor.

Ordinariamente se hace retrocruzamiento al citoplasma estéril con IS 1309C, IS 3625C, IS 7173C, IS 12539C, e IS 12685C, para producir líneas A de prueba tolerantes al Al. La mayoría de estas líneas no son apropiadas como padres en híbridos comerciales; por lo tanto, las líneas IS 7173C e IS 12685C han sido cruzadas con una línea B elite de los Estados Unidos por el método estándar de mejoramiento por pedigrí.

Dos poblaciones de cruzamiento al azar con esterilidad genética masculina *ms₁*, del programa de mejoramiento de Mississippi que adelanta el autor, fueron usadas como poblaciones base de resistencia a enfermedades para desarrollar acervos de líneas B y R tolerantes al Al. A medida que se encuentran sorgos exóticos promisorios tolerantes al Al, éstos se cruzan con el acervo apropiado. Resembrando estas poblaciones dos veces por año en suelos con un 60% a 70% de saturación de Al, los genes tolerantes al Al se concentrarán en las plantas que sobrevivan. Este método de mejoramiento de poblaciones es ideal para la tolerancia al Al, ya que las plantas susceptibles mueren antes de donar sus genes a la población.

Este esfuerzo de selección y de mejoramiento no es de valor alguno, a menos que el germoplasma tolerante al Al sea distribuido libremente a los programas nacionales de mejoramiento de sorgo, a las compañías comerciales de semillas, y al agricultor. Cada año los mejores genotipos tolerantes al Al son puestos a disposición de los ensayos regionales de rendimiento. Otros genotipos exóticos, líneas mejoradas y poblaciones segregantes son enviadas a los fitomejoradores cuando son solicitadas.

Resumen

Un procedimiento sistemático de selección se está empleando para evaluar una parte significativa de la colección mundial de sorgo respecto a la tolerancia a la toxicidad de Al en suelos

tropicales de escaso contenido de bases. A través de la cooperación y la colaboración con centros internacionales de investigación agrícola, con programas nacionales, universidades y compañías comerciales, INTSORMIL ha contribuido a hacer disponible una cantidad sustancial de germoplasma de sorgo exótico, tolerante al Al, para los científicos que desarrollan investigación en los suelos ácidos del trópico de los países en vías de desarrollo.

Referencias

- Acheampong, E.; Anishetty, N. M. y Williams, J. T. 1984. A world survey of sorghum and millets germplasm. AGPG:IBPGR/83/5. International Board for Plant Genetic Resources (IBPGR), Secretaría, Roma.
- Bastos, C. R. 1981. Toxicity of aluminum in nutrient solution to sorghum seedlings. Tesis (M.S.). Mississippi State University, Mississippi State, MS, E.U.
- . 1982. Inheritance study of aluminum tolerance in sorghum in nutrient culture. Tesis (Ph.D.). Mississippi State University, Mississippi State, MS, E.U.
- y Gourley, L. M. 1982. Rapid screening of sorghum seedlings for tolerance to low pH and aluminum. En: House, L. R.; Mughogho, L. K. y Peacock, J. M. (eds.). Sorghum in the eighties. Patancheru, A.P., India. p. 742.
- CIAT (Centro Internacional de Agricultura Tropical). 1983. Informe CIAT 1983. Cali, Colombia. 132 p.
- Cochrane, T. T. 1978. An ongoing appraisal of the savanna ecosystems of tropical America for beef cattle production. En: Sánchez, P. A. y Tergas, L. E. (eds.). Pasture production in acid soils of the tropics. CIAT, Cali, Colombia. p. 1-2.
- Conservation and utilization of exotic germplasm to improve varieties. 1984. En: The 1983 plant breeding research forum. Resumen. Pioneer Hi-Bred International, Des Moines, Iowa, E.U.
- Doggett, H. 1970. Sorghum. Longman, Green and Co., Londres. 403 p.
- dos Santos, H. L. Jr.; Baligar, V. C. y Vasconcellos, C. A. 1980. Screening sorghum genotypes for aluminum tolerance. En: Annual 13th Brazilian Maize and Sorghum Rev. IAPAR (Fundação Instituto Agropecuário de Paraná), Londrina, Paraná, Brasil. p. 24.
- FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations). 1983. Production Yearbook 1982. FAO, Roma. 320 p.

- Furlani, P. R. y Clark, R. B. 1981. Screening sorghum for aluminum tolerance in nutrient solutions. *Agron. J.* 73:587-594.
- Gourley, L. M. 1983. Breeding sorghum for tolerance to aluminum toxic tropical soils. En: *Proceedings of the plant breeding methods and approaches in sorghum workshop for Latin America*. CIMMYT (Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo), El Batán, México. p. 299-313.
- Pitta, G. V. E.; Trevisan, W. L.; Schaffert, R. E.; de Franca, G. E. y Bahia, A. F. C., Jr. 1976. Evaluations of sorghum lines under high acidity conditions. En: *Annual 11th Brazilian Maize and Sorghum Rev. ESAL (Escola Superior de Agricultura de Lavras)*, Piracicaba, São Paulo, Brasil. p. 553-557.
- Reeve, N. G. y Summer, M. E. 1970. Effects of aluminum toxicity and phosphorus fixation on crop growth in Oxisols in Natal. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 34:263-267.
- Ritchey, K. D.; Souza, D. M. G.; Lobanta, E. y Correa, O. 1980. Calcium leaching to increase rooting depth in a Brazilian savannah Oxisol. *Agron. J.* 72:40-44.
- Sánchez, P. A. y Salinas, J. G. 1981. Low-input technology for managing Oxisols and Ultisols in tropical America. *Adv. Agronomy* 34:279-406.
- Schaffert, R. E.; McGrate, A. J.; Trevisan, W. L.; Bueno, A.; Meira, J. L. y Rhykerd, C. L. 1975. Genetic variation in *Sorghum bicolor* (L.) Moench for tolerance to high levels of exchangeable aluminum in acid soils of Brazil. En: *Proceedings of a sorghum workshop*. University of Puerto Rico, Mayagüez, Puerto Rico. p. 151-160.

GRUPOS DE TRABAJO

Informe de la Sesión de Trabajo del Grupo 1 (Científicos)

Investigadores

El Grupo 1 se reunió el 30 de mayo de 1984 y discutió el orden del día suministrado. La reunión fue presidida por el Dr. Vartan Guiragossian y las notas fueron registradas por el Dr. Oscar de Córdoba. A continuación se presentan las conclusiones y recomendaciones.

Mejoramiento y Selección para Suelos con Al: Metas y Estrategias

Los investigadores de sorgo desean reconocer el trabajo preliminar iniciado por el International Sorghum and Millet Program (INTSORMIL) y por el International Crops Research Institute for the Semi-Arid Tropics (ICRISAT) en la búsqueda de nuevo germoplasma que pueda cultivarse en los suelos tropicales de América del Sur que presentan problemas de alta acidez y de toxicidad por Al.

La coordinación de la planeación y ejecución de las diversas áreas de investigación entre los programas nacionales y las organizaciones internacionales tales como INTSORMIL, ICRISAT y el Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), es una manera eficiente de resolver los problemas pertinentes, de encontrar genotipos adaptados a los suelos ácidos con alto contenido de Al, y de desarrollar la tecnología necesaria para identificar y mejorar estos genotipos.

Además de los países involucrados, las organizaciones internacionales también deben asumir la responsabilidad de encontrarle una solución al problema.

Agroclimatología

Debe recolectarse la información agroclimatológica para las regiones de América del Sur con suelos ácidos de alto contenido de Al. El Dr. Lynn Gourley asumió la responsabilidad de recolectar datos agroclimatológicos y edáficos para las zonas con suelos ácidos de alto contenido de Al, en colaboración con representantes de los países que asisten a este taller y con el Dr. J. Nicholaides, quien sería el asesor para la colección e interpretación de los datos. El Dr. N. Seetharama debe enviarle al Dr. Gourley toda la información disponible en el ICRISAT relacionada con datos agroclimatológicos, y las metodologías empleadas. El Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA) debe servir como centro para enviar la información agroclimatológica a las diversas zonas.

Germoplasma

Para mejorar la eficiencia en la búsqueda de germoplasma apropiado para zonas con suelos ácidos de alto contenido de Al, el movimiento de germoplasma debe hacerse por intermedio de la estación de investigación de INTSORMIL en el CIAT, Colombia, y de la de ICRISAT, en México. Para hacerlo, los países interesados deben enviarle a ICRISAT muestras de semilla (20 a 40 g) de cada genotipo, la legislación actual, y los requerimientos de cada país para la importación y exportación de muestras de semilla experimental. Las empresas privadas interesadas en obtener germoplasma de sorgo de INTSORMIL e ICRISAT deben cumplir con las regulaciones establecidas en cada país. Deben informarle a INTSORMIL e ICRISAT sobre los resultados que obtengan.

Los programas nacionales e INTSORMIL, que tengan germoplasma con tolerancia a suelos ácidos con alto contenido de Al, deben enviar a ICRISAT (México) muestras de 20 a 40 g de semilla de cada genotipo para su multiplicación inmediata, con el fin de que estos materiales puedan ponerse a disposición de otros países interesados.

Como Brasil ha realizado algunas investigaciones avanzadas sobre tolerancia del sorgo a los suelos ácidos, los científicos de ese país deben recibir del ICRISAT las colecciones de Tanzania, Tailandia, INTSORMIL y CIAT para su evaluación. El Dr. Gourley, de INTSORMIL, debe evaluar todos los materiales colectados en el laboratorio o en el campo.

Como la colección mundial es grande y difícil de evaluar por una sola institución, INTSORMIL e ICRISAT deben solicitarle a los programas nacionales de los países y a las compañías privadas que les ayuden a evaluar algunos de estos materiales bajo la supervisión de INTSORMIL e ICRISAT.

La información obtenida por los programas nacionales y otras instituciones sobre la evaluación del germoplasma debe enviarse por intermedio de representantes de INTSORMIL e ICRISAT para que sea distribuida a los investigadores de cada país.

Fisiología

Los mecanismos fisiológicos de la tolerancia o la susceptibilidad a altos niveles de Al en suelos ácidos son fundamentales, no sólo para el conocimiento de esos problemas, sino también para el desarrollo de metodologías más apropiadas, de tal manera que las pruebas de laboratorio puedan ser validadas en el campo. De esta manera se podrán seleccionar genotipos con mayor potencial agronómico de producción.

Se recomendó que el Dr. Dale Ritchey, en colaboración con los Drs. P. Furlani y G. Pitta, se responsabilizaran de la realización de buena parte de la investigación fisiológica. Los científicos de INTSORMIL e ICRISAT deben estudiar la estructura básica de la forma como operan los mecanismos fisiológicos de resistencia a la toxicidad por Al, y colaborar con los científicos de los países interesados. Si es posible, se deben asignar estudiantes de posgrado a investigaciones colaborativas orientadas a entender esos mecanismos de resistencia.

El Dr. R. Clark fue designado para recolectar y distribuir información metodológica (posiblemente en la forma de un boletín), ya sea sugerida o simplemente disponible, a los investigadores en cada uno de los países interesados. Debe incorporarse la estandarización de la metodología, del análisis y de las expresiones numéricas.

Los Drs. John Nicholaides Jr., Stanley Buol y K. Dale Ritchey presentaron una propuesta de definición de suelo tóxico por Al para la evaluación de campo de las líneas de sorgo de la colección mundial o del material de mejoramiento.

1. Suelo superficial corregido hasta una profundidad máxima de 50 cm.

2. Método analítico y grado de saturación de Al acorde con ese método.

A) Método del KCl 1 N:

$$\text{Sat. Al, \%} = \frac{\text{meq Al}}{\text{meq [Ca + Mg + K + Al]}} \times 100 (= 60\%)$$

A menos que el suelo tenga una capacidad efectiva de intercambio de cationes (CIC_e) muy baja, los meq de Al por 100 cm^3 de suelo deberían ser 1.5, por lo menos.

B) Método del NH_4OH , a pH 7:

$$\text{Sat. Al, \%} = \frac{\text{meq [Al + H]}}{\text{meq [Ca + Mg + K + Al + H]}} \times 100 (= 67\%)$$

C) Método de TEA y BaCl_2 a pH 8.2:

$$\text{Sat. Al, \%} = \frac{\text{meq [Al + H]}}{\text{meq [Ca + Mg + K + Al + H]}} \times 100 (= 76\%)$$

(TEA = trietanolamina).

3. Los siguientes elementos deben tener el nivel indicado, o uno mayor, según el método empleado:

P 15 ppm método: Bray II

12 ppm método: Olsen (o modificación de Olsen)

18 ppm método: Carolina del Norte (doble ácido)

Ca 0.50 meq/ 100 cm^3 suelo método: KCl 1 N

Mg 0.25 meq/ 100 cm^3 suelo método: KCl 1 N

K 0.20 meq/ 100 cm^3 suelo método: Olsen (o modificación de Olsen)

4. Los demás elementos no deben ser limitantes.

Mejoramiento

Cada investigador debe utilizar métodos apropiados para el fitomejoramiento, compatibles con la disponibilidad de los recursos económicos y de la tecnología.

Los mecanismos de herencia de la tolerancia de la planta a los suelos altos en Al son importantes para entender esa tolerancia. Se sugirió que Brasil e INTSORMIL, que ya han iniciado estudios genéticos, los continúen. INTSORMIL debe incorporar estudiantes de posgrado de los países interesados en estudios genéticos colaborativos, quienes participarían con sus trabajos de tesis. INTSORMIL e ICRISAT deben involucrar a los programas nacionales o a otras instituciones en los estudios de los mecanismos genéticos de tolerancia o susceptibilidad a los suelos ácidos con alto contenido de Al.

Cada país debe hacer sus propios ensayos durante 1984 y enviar los datos al Sr. Renato Borgonovi en Brasil, quien los coleccionará, analizará y distribuirá. Partiendo de estos resultados, desde 1985 se podrán planear pruebas uniformes en diferentes sitios críticos de cada país (Cuadro 1).

Cuadro 1. Sitios de interés de los programas nacionales para ensayos uniformes.

País	Localidad
Colombia	La Libertad, Llanos Orientales Carimagua, Llanos Orientales
Venezuela	El Sombrero, Llanos Centrales El Tigre, Llanos Orientales
Perú	Yurimaguas, Amazonia Puerto Maldonado, Amazonia
Brasil	Instituto Agronómico de Campinas (IAC), Mococa, São Paulo Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA), Sete Lagoas, Minas Gerais EMBRAPA/AGROCERES, Capinópolis, Minas Gerais

Los aspectos agronómicos y económicos son muy importantes y deben considerarse una vez se haya entregado la información básica.

Capacitación e Información sobre Servicios

Los profesionales de países interesados pueden solicitar los siguientes tipos de capacitación de INTSORMIL e ICRISAT:

1. ICRISAT ofrece dos cursos de capacitación: un curso de una semana en México cada año sobre diferentes aspectos del manejo, de la producción biológica, y del cultivo del sorgo; y un curso de capacitación de cinco a seis meses en la sede principal de India o en México.
2. INTSORMIL ofrece oportunidades de hacer investigación básica para optar títulos de M.S. o Ph.D. en los Estados Unidos, sobre problemas asociados con la producción de sorgo en suelos tropicales de América del Sur que tengan alto contenido de Al. Algunas veces la investigación se adelanta en el país de origen. Deben considerarse también períodos cortos de capacitación con científicos o laboratorios específicos; este adiestramiento se ofrece con frecuencia.

Las recomendaciones relacionadas con la información sobre servicios son las siguientes:

1. Las personas que estén buscando información sobre diferentes aspectos del sorgo deben ponerse en contacto con el Sorghum and Millets Information Centre (SMIC) en ICRISAT.
2. Es importante que la actual información respecto a la tolerancia al Al, acumulada en cada país, sea enviada al Dr. Lynn Gourley, quien recolectará esa información y la distribuirá a las personas interesadas.

Los coordinadores nacionales deben reunirse, por lo menos, una vez al año para informarse unos a otros sobre las actividades recientes desarrolladas en sus países, y para planear acciones hacia el futuro.

Otras Recomendaciones

1. El representante oficial de cada país debe solicitarle a las autoridades de INTSORMIL e ICRISAT que amplíen a América del Sur sus actividades sobre problemas de suelos ácidos.
2. El grupo de investigadores de sorgo de América tropical que trabaja en problemas de suelos ácidos con alto contenido de Al debe recibir un nombre, por ejemplo, ISAT (Investigadores de Sorgo de América Tropical).
3. El grupo debe considerar seriamente la preparación de una propuesta regional que sería presentada ante las organizaciones financieras internacionales, de tal manera que se pueda

asegurar la continuidad de las investigaciones en caso de que INTSORMIL o ICRISAT suspendan su participación.

Los investigadores de sorgo de América tropical agradecen a INTSORMIL, ICRISAT y CIAT por haber costeado y organizado los elementos físicos de esta reunión.

Informe de la Sesión de Trabajo del Grupo 2 (Administradores)

Administradores

El Grupo 2 se reunió el 30 de mayo de 1984 y discutió el orden del día suministrado. Desde el comienzo se acordó que las prioridades científicas serían fijadas por los científicos y que los administradores se concentrarían en los aspectos organizativos y estructurales. La reunión fue presidida por el Dr. Fernando Arboleda y las notas fueron registradas por el Dr. R. R. Foil. A continuación se presentan las conclusiones y recomendaciones.

Recomendaciones

Ambiente agroclimatológico

El International Sorghum and Millet Program (INTSORMIL), con la ayuda del Tropical Soils Program of North Carolina State University (TROPISOILS), debe buscar la colaboración de los programas nacionales y del Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA) en el desarrollo de criterios y protocolos estandarizados para ensayos cooperativos uniformes en las localidades de prueba del trópico; las que potencialmente sirven para ese propósito se registran en el Cuadro 1.

Germoplasma

El International Crops Research Institute for the Semi-Arid Tropics (ICRISAT) debe dirigir el diseño y la coordinación de un mecanismo para la recolección, el movimiento y la catalogación de germoplasma de América del Sur, y la formación de una red de programas de mejoramiento genético. Este plan debe incluir el establecimiento de una colección de trabajo en el Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT) y en el Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo (CIMMYT) para que sea coordinada por el Dr. V. Guiragossian.

Cuadro 1. Sitios potenciales en el trópico para el desarrollo de criterios y protocolos estandarizados de ensayos colaborativos uniformes.

País	Localidad
Colombia	La Libertad, Llanos Orientales Carimagua, Llanos Orientales
Venezuela	El Sombrero, Llanos Centrales El Tigre, Llanos Orientales
Perú	San Ramón, Amazonia Puerto Maldonado, Amazonia
Brasil	Instituto Agronómico de Campinas (IAC), Mocoa, São Paulo Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA), Sete Lagoas, Minas Gerais EMBRAPA, Triangulo Mineiro, Minas Gerais

Fisiología, mejoramiento, agroeconomía y sistemas agrícolas

Los programas nacionales presentes acordaron organizar y coordinar actividades. Los datos provenientes de ensayos uniformes serían intercambiados y presentados en un formato estándar. La secretaría para comunicaciones y coordinación sería rotatoria, comenzando con Brasil en 1984-1985. INTSORMIL y otras agencias internacionales de investigación deben contribuir con la investigación detallada o fundamental que se requiera, y hacerle seguimiento.

Capacitación

ICRISAT da la bienvenida a profesionales de América del Sur que vengan a sus programas de capacitación en sorgo (se requiere conocimiento del idioma inglés). INTSORMIL debe continuar e incrementar el componente de capacitación para grado académico de su programa. Se requieren reuniones de trabajo conjuntas o separadas de ICRISAT e INTSORMIL, en el CIAT o en el CIMMYT y en otros sitios de América del Sur. El grupo acordó explorar las posibilidades que hay para la actividad colaborativa de capacitación en servicio mediante intercambios de personal.

Sería apropiado hacer cada tres años un simposio sobre 'Sorgo en América del Sur'.

Difusión de información

El ICRISAT revisará la organización de los programas nacionales para asegurarse de que los investigadores de América del Sur y de INTSORMIL estén en los listados de correo.

Otras sugerencias

Es muy deseable la colaboración del IICA en la organización y planeación de los programas regionales.

Participación

Estuvieron presentes los siguientes delegados:

Dr. Fernando Arboleda, Coordinador nacional, Instituto Colombiano Agropecuario (ICA), Colombia; Presidente de la sesión.

Dr. Héctor Mena, Coordinador nacional, Fondo Nacional de Investigaciones Agropecuarias (FONAIAP), Venezuela.

Dr. Antonio Pinchinat, Líder del proyecto y fitomejorador, IICA, Lima, Perú.

Dr. Luis Narro León, Líder del programa nacional, Instituto Nacional de Investigaciones y Promoción Agraria (INIPA), Cajamarca, Perú.

Dr. Cândido Bastos, Director de especies industriales, Instituto Agronómico de Campinas (IAC), Brasil.

Dr. Renato Borgonovi, Coordinador del Programa Nacional de Investigación de Sorgo, EMBRAPA/Centro Nacional de Pesquisa de Milho e Sorgo (CNPMS), Sete Lagoas, Brasil.

Oscar Jurado, Programa de Investigación de Proacol.

Hugo Montealegre, Programa de Sorgo de Colsemillas.

Rodney Foil, Miembro del Comité Conjunto sobre Investigación y Desarrollo Agrícola (JCARD) de la Junta de Desarrollo Internacional de la Alimentación y la Agricultura (BIFAD), y Director de la Estación Experimental Agrícola y Forestal de Mississippi, E.U.

Carmen Laserna, Semillas El Zorro, Ibagué, Colombia.

John Peacock, Fisiólogo principal, ICRISAT, Hyderabad, India.

Participantes

Brasil

Cândido Ricardo Bastos
Director, División de Especies Industriales
Instituto Agronômico de Campinas
Av. Barao de Itapura 1481
Caixa Postal 28
13.100 Campinas, São Paulo
Tel: 31-5422

Renato A. Borgonovi
Coordinador, Programa Nacional de Sorgo
CNPMS/EMBRAPA
Caixa Postal 151
35.700 Sete Lagoas, Minas Gerais
Tel: (031)921-5644
Télex: 2099

Pedro Roberto Furlani
Instituto Agronômico de Campinas
Av. Barao de Itapura 1481
Caixa Postal 28
13.100 Campinas, São Paulo
Tel: 31-5422 - R. 182

Gilson V.E. Pitta
Investigador III
CNPMS/EMBRAPA
Caixa Postal 151
35.700 Sete Lagoas, Minas Gerais
Tel: (031) 921-5644
Télex: 2099

Paulo Motta Ribas
Mejoramiento y Producción de Sorgo
Sementes Agroceres S/A
Km 25 Rod. MGT - 154
Caixa Postal 81
38.360 Capinópolis, Minas Gerais
Tel: (034)263-1086

Kenneth Dale Ritchey
Consultor sobre Fertilidad de Suelos
CPAC-EMBRAPA
Caixa Postal 70-0023
73.300 Planaltina, DF
Tel: (61)272-0538

Colombia

Fernando Arboleda Rivera
Coordinador del Programa Nacional de Maíz y Sorgo
Instituto Colombiano Agropecuario (ICA)
Apartado Aéreo 233
Palmira, Valle
Tel: 33949

Jaime Barbosa
Gerente General
Semillas Valle
Apartado Aéreo 3603
Cali, Valle
Tel: 661904
Télex: 51137

Carlos Julio Carvajal
Investigador, Maíz y Sorgo
ICA
Ocobos, Bloque 15, Apto. 302
Ibagué, Tolima
Tel: 650923

Héctor Gustavo Duque V.
Asistente de Investigación
PROACOL Ltda.
Apartado Aéreo 403
Palmira, Valle
Tel: 51546

Mario Giraldo Zuluaga
Administrador de la Planta de Semillas
Caja Agraria-CRESEMILLAS
Apartado Aéreo 240
Palmira, Valle
Tel: 23677/22360

Gilberto Gómez Barros
Maíz y Sorgo
ICA
Apartado Aéreo 21
Codazzi, Cesar
Tel: 30165

Miguel G. González V.
División Técnica
Semillas Valle
Apartado Aéreo 3603
Cali, Valle
Tel: 661986
Télex: 51137

Reinhart H. Howeler
Programa de Yuca, CIAT
c/o Field Crops Research Institute
Department of Agriculture
Bangkhen, Bangkok 10900
Tailandia
Tel: 579-7551
Télex: 84478 INTERAG TH

Oscar Jurado Z.
Asistente de Investigación
PROACOL Ltda.
Apartado Aéreo 403
Palmira, Valle
Tel: 51546

Douglas R. Laing
Director General Adjunto
CIAT
Apartado Aéreo 6713
Cali, Valle
Tel: 675050
Télex: 05769 CIAT CO

Carmen Laserna
Vicegerente
Semillas El Zorro
Calle 12 No. 1-17
Ibagué, Tolima
Tel: 632046

Luis Alfredo León
Proyecto Fósforo, IFDC
CIAT
Apartado Aéreo 6713
Cali, Valle
Tel: 675050
Télex: 05769 CIAT CO

César Martínez
Programa de Arroz
CIAT
Apartado Aéreo 6713
Cali, Valle
Tel: 675050
Télex: 05769 CIAT CO

Lawrence L. Mintz
Junta Directiva
FENALCE
Apartado Aéreo 7889
Cali, Valle
Tel: 631175

Hugo Montealegre Cuéllar
Semillas La Pradera
Avenida 15 No. 123-01
Bogotá, D.E.
Tel: 2144747

Octavio Mosquera
Laboratorio de Análisis de Suelos
CIAT
Apartado Aéreo 6713
Cali, Valle
Tel: 675050
Télex: 05769 CIAT CO

Fernando Munévar
Director del Programa de Suelos
ICA
Apartado Aéreo 151123
Bogotá, D.E.
Tel: 2673013

Jorge Ortega
Programa de Frijol
CIAT
Apartado Aéreo 6713
Cali, Valle
Tel: 675050
Télex: 05769 CIAT CO

Eric J. Owen
Director Regional de Investigación
ICA
Apartado Aéreo 2011
Villavicencio, Meta
Tel: 24701

César Ruiz Gómez
Agrónomo
Maíz y Sorgo
ICA La Libertad
Villavicencio, Meta
Tel: 24701

José G. Salinas
Programa de Pastos Tropicales
CIAT
Apartado Aéreo 6713
Cali, Valle
Tel: 675050
Télex: 05769 CIAT CO

Luis Fernando Sánchez
Programa de Suelos
ICA
CRI La Libertad
Apartado Aéreo 2011
Villavicencio, Meta
Tel: 24701

Carlos Seré
Programa de Pastos Tropicales
CIAT
Apartado Aéreo 6713
Cali, Valle
Tel: 675050
Télex: 05769 CIAT CO

Manuel Torregroza Castro
Director de la División Agronómica
ICA
Apartado Aéreo 151123
Bogotá, D.E.
Tel: 2814942

José E. Vargas Sánchez
Agrónomo
Investigador, Sorgo y Maíz
ICA
Apartado Aéreo 233
Palmira, Valle
Tel: 28162/28166

Estados Unidos Stanley W. Buol
Profesor de Suelos
North Carolina State University
Raleigh, NC 27650
Tel: (919)737-2388
Télex: 579369

Ralph B. Clark
Fisiólogo Vegetal, Profesor
USDA-ARS
Department of Agronomy
279 Plant Sciences
University of Nebraska
Lincoln, NE 68583
Tel: (402)489-4954
Télex: 438087

Rodney Foil
Director
MAFES
Mississippi State University
P.O. Drawer ES
Mississippi State, MS 39762
Tel: (601)325-3005

Lynn M. Gourley
(Antes: Líder del Proyecto Sorgo, CIAT)
Actual: Dept. of Agronomy
Box 5248
Mississippi State University
Mississippi State, MS 39762
Tel: (601)325-2311

John J. Nicholaides, III
Associate Dean and Director International Agriculture
114 Mumford Hall
University of Illinois
Urbana, IL 61801
Tel: (217)333-6420

S. Ann Rogers
Asistente de Investigación, Graduada
Mississippi State University
Box 5248
Mississippi State, MS 39762
Tel: (601)325-2311

India

John Michael Peacock
Fisiólogo de Cultivos, Jefe
Sorghum Improvement Program
ICRISAT
Patancheru Po.
Andhra Pradesh 502324
Hyderabad
Tel: 224016
Télex: 0152-203

Naador Seetharama
Fisiólogo Vegetal
ICRISAT
Patancheru Po.
Andhra Pradesh 502324
Hyderabad
Tel: 224016
Télex: 0152-203

México

Vartan Guiragossian
Fitomejorador
ICRISAT/CIMMYT
Lisboa 27, Col. Juárez
Apdo. Postal 6-641
México, D.F. 06600
Tel: (52)595-42100
Télex: 1772023 CIMTME

Evangelina Villegas
Jefe, Servicio de Laboratorios
CIMMYT
Lisboa 27, Col. Juárez
Apdo. Postal 6-641
México, D.F. 06600
Tel: (52)595-42100
Télex: 1772023 CIMTME

Perú

Oscar Agreda Turriate
Director Ejecutivo
Instituto de Investigaciones de la Amazonia
Peruana
Jr. Nauta 289
Iquitos
Tel: 235-527/234-292

Luis Alberto Narro León
Líder, Programa Nacional de Maíz
INIPA
Guzmán Blanco 309
Lima
Tel: 320510

Antonio M. Pinchinat
Genetista
IICA
Lima
Tel: 222833

Venezuela

Oscar R. de Córdoba
Supervisor Regional de Investigación
Cargill Inc., Seed Division
Centro Andrés Bello, Of. 102
Avenida Las Delicias
Apartado 2332
Maracay 2101
Tel: 043-417121/043-414545
Télex: 48148

Héctor A. Mena T.
Jefe, Instituto de Investigación Agronómica
Coordinador de Sorgo
FONAIAP-CENIAP
Via el Limón, Apdo. 4653
Maracay, Aragua
Tel: 22475/22485

Indice

- Almacenamiento 233, 322
- Aluminio, 68, 81
- cultivares sensibles a, 58, 179, 205, 273, 289
 - fosfatos de, 67, 68, 71
 - índice de tolerancia a, 184, 187, 192, 210, 300, 323
 - intercambiable, 81, 124, 133, 136, 142, 146
 - niveles de saturación de, 63, 75, 80, 81, 83, 86, 109-117, 134, 165, 174-175, 193, 212, 295, 331
 - tolerancia genética a, 37, 44, 109, 110, 118, 128, 147, 184, 192, 293, 313, 317
 - toxicidad de, 95, 109, 110, 114, 136
- Área sembrada, 38, 141, 154, 162, 175
- Calcio (Ca), 41, 71, 82, 131, 138, 318
- deficiencia de, 95, 123, 125, 138, 263
 - fosfatos de, 65, 67, 75
 - intercambiable, 123, 126, 129, 139
- Cerrado brasileño, 104, 197, 285, 287, 293, 309, 313
- CIAT, 14, 42, 63, 72, 74, 158, 184, 187, 197, 202, 205, 273, 310, 329, 335
- Cosecha, 38, 165, 167, 172, 175, 247, 291, 322
- Cultivares, 31, 111, 142, 293, 301, 313
- Cultivo, 20
- domesticación, 19
 - sistemas, 240
- Demanda de grano, 38, 153, 155
- EDXRF (dispersión energética por rayos X...), 254-262
- Elementos minerales
- análisis (ver EDXRF)
 - toxicidad por, 43, 82, 207, 209, 210, 211, 219, 263, 278
- EMBRAPA, 124, 133, 313, 322
- Establecimiento de cultivos, 25, 27, 41, 61, 87, 165, 170
- Estrés abiótico, 25, 27, 31
- Estrés biótico, 25, 29, 31
- por enfermedades, 29, 55, 201, 205
 - por insectos, 30, 201, 205
 - por malezas, 29, 55, 168
- Fosfatos
- adsorción, 68
 - distribución, 65
 - fijación, 68
 - reacción, 68, 71
 - retención, 68, 76
 - solubilidad, 65, 67, 72, 76
 - transformación, 67, 71, 72
- Fósforo (P), 55, 63, 66, 74, 103
- absorción, 74, 86, 128, 191, 208, 211, 242
 - deficiencia, 41, 83, 95, 191, 207, 239, 250, 257
 - disponibilidad, 72, 84, 106, 208, 317
 - distribución, 65, 67
 - fertilización, 58, 63, 65, 67, 73, 75, 84, 100, 102, 106, 130, 208, 255
 - fijación, 57, 63, 68, 70, 75, 84, 309

- formas, 63, 64, 66
 inerte, 66
 inorgánico, 65, 66
 meteorización química, 66, 75
 nivel de estrés de, 213, 219, 239, 255, 292
 orgánico, 65, 75
 retención de, 57, 59, 66
 usado por la planta, 72, 85, 251
 inoculando con micorrizas, 75, 76, 86, 87, 106, 191, 253, 254, 317
- Genotipos, 37, 136, 257, 270, 276, 277, 292, 297, 314, 316, 323
 adaptación, 41, 244, 246, 315
 características agronómicas, 43, 291, 297
- Germoplasma, 24, 101, 164, 174, 193, 201, 229, 291, 300
 colección de, 27, 180, 224, 232, 235, 303, 313
 intercambio de, 21, 303
 métodos de selección de, 24-26, 182, 190, 215, 231, 247, 250, 295, 324
- Híbridos, 21, 31, 33, 38, 131, 145, 250, 290, 299, 320
- ICRISAT, 14-15, 17, 19, 30, 34, 226, 233, 324, 329, 333, 334
 programas de investigación en sorgo, 24, 29, 239
 programas de mejoramiento de, 21, 23, 25, 33, 34, 236, 320
- Incidencia de plagas y enfermedades, 36, 157, 184, 185, 191, 233, 279, 305
- INTSORMIL, 5, 11, 13, 14, 43, 313, 323, 329, 333
 capacitación, 12, 333
 investigación en sorgo, 11, 13, 15, 43, 270, 320
- Investigación, 23, 41, 42, 175, 273, 279, 290, 304
 programas de, 33, 205
- Materia orgánica (ver Suelos)
- Material genético (ver Germoplasma)
- Mejoramiento genético, 31, 293, 332
 de líneas, 31, 133, 139, 185, 202, 302
 programas de, 31, 34, 109, 116, 153, 201, 203, 250, 269, 299, 320, 337
- Nitrógeno, 297, 309
 deficiencia de, 95, 219, 239
 eficiencia, 247, 250
 fijación de, 103
 residual, 105
- Oxisoles, 52, 65, 93, 142, 311
 capacidad de intercambio catiónico (CIC), 53
 fertilizantes en, 55, 56, 97, 102
 fijación del fósforo en, 58, 64, 65
 limitantes edáficas de, 80, 83, 95, 100
 niveles de Al, 63, 175
 P inorgánico en, 67
 pH de, 53, 201
 propiedades de, 51, 53
 retención de agua en, 95, 201, 318
- pH
 del suelo, 58, 82, 86, 124, 146, 160, 202, 207, 265, 282
 en solución de suelo, 80, 181
- Periodo vegetativo, 37, 38
- Producción, 12, 14, 20, 22, 29, 37, 142, 156, 163, 170, 263, 288
- Raíces
 crecimiento, 123, 125, 138, 182, 184, 203, 209, 290, 295, 318
 longitud, 134, 135, 199, 292, 294, 300
 longitud relativa (LRR), 185, 186, 193
- Recolección (ver Cosecha)

