

Sistemas Agropastoriles:

Un Enfoque Integrado para el
Manejo Sostenible de Oxisoles de
los Llanos Orientales de Colombia

Editores:

Edgar Amézquita
Idupulapati M. Rao
Mariela Rivera
Irlanda I. Corrales
Jaime H. Bernal



MinAgricultura
Ministerio de Agricultura
y Desarrollo Rural

**PROSPERIDAD
PARA TODOS**



Corpoica
Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria



CIAT
Centro Internacional de Agricultura Tropical
Desde 1967 | *Ciencia para cultivar el cambio*

CIAT

El Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT) —miembro del Consorcio CGIAR— desarrolla tecnologías, métodos innovadores y nuevos conocimientos que contribuyen a que los agricultores, en especial los de escasos recursos, logren una agricultura eco-eficiente —es decir, competitiva y rentable así como sostenible y resiliente. La agricultura eco-eficiente reduce el hambre y la pobreza, mejora la nutrición humana y brinda soluciones ante la degradación ambiental y el cambio climático en los trópicos. Con su sede principal cerca a Cali, Colombia, el CIAT realiza investigación orientada al desarrollo en las regiones tropicales de América Latina, África y Asia.

www.ciat.cgiar.org

CGIAR es una alianza mundial de investigación que procura lograr una mayor seguridad alimentaria. Su labor científica la llevan a cabo los 15 centros de investigación que conforman el Consorcio CGIAR, en colaboración con cientos de organizaciones socias.

www.cgiar.org

Corpoica

La Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (Corpoica), creada el 25 de enero de 1993, es una entidad pública descentralizada por servicios con régimen privado, encargada de generar conocimiento científico y soluciones tecnológicas a través de actividades de investigación, innovación, transferencia de tecnología y formación de investigadores en beneficio del sector agropecuario colombiano. La visión de Corpoica para el 2019 es la de ser una organización líder en la investigación e innovación para el sector agropecuario colombiano, con alto reconocimiento en los ámbitos nacional e internacional por su rigor científico, la calidad de sus procesos, servicios, productos y por entregar soluciones pertinentes al agro colombiano; articulada al sistema nacional e internacional de la ciencia y tecnología, con estabilidad económica y patrimonial.

En respuesta a los lineamientos del Plan Nacional de Desarrollo 2010-2014 “Prosperidad para todos” y al mandato del Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural (MADR) de Colombia, Corpoica avanza en sus roles de ser Motor, Actor y Soporte de la innovación del sector agropecuario colombiano.

www.corpoica.org.co

Ciencia, Tecnología e Innovación: el Futuro de la Orinoquia

El Convenio de cooperación técnica y científica para el desarrollo sostenible y competitivo de la Orinoquia colombiana, suscrito entre el Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural (MADR) de Colombia, la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (Corpoica) y el Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), inició en marzo de 2011 con el objeto de desarrollar y validar tecnologías para el mejoramiento de la productividad y la sostenibilidad de los sistemas de producción agropecuarios de la Altillanura plana de la Orinoquia colombiana.

Asimismo, busca fortalecer las capacidades científicas y tecnológicas en la región, desarrollar investigación que brinde información sobre la incidencia del cambio climático en la producción agropecuaria y su impacto en los recursos naturales, establecer indicadores para el manejo eco-eficiente de los sistemas productivos y llevar a cabo estrategias de difusión y capacitación.

Los ensayos de investigación y validación de tecnología están ubicados en estaciones experimentales de Corpoica (Taluma, Carimagua y La Libertad), del CIAT (Santa Rosa) y en varias fincas de productores de la Altillanura.

www.futuro-orinoquia.org

ISBN 978-958-694-117-4
Documento de Trabajo CIAT No. 223

Sistemas Agropastoriles: Un Enfoque Integrado para el Manejo Sostenible de Oxisoles de los Llanos Orientales de Colombia

Editores:

Edgar Amézquita
Idupulapati M. Rao
Mariela Rivera
Irlanda I. Corrales
Jaime H. Bernal



Centro Internacional de Agricultura Tropical
International Center for Tropical Agriculture
Apartado Aéreo 6713
Cali, Colombia
Tel.: 57 2 4450000
Fax: 57 2 4450073
Correos electrónicos: i.rao@cgiar.org
m.rivera@cgiar.org
Sitio web: www.ciat.cgiar.org

Documento de Trabajo CIAT No. 223
ISBN 978-958-694-117-4
Tiraje: 500 ejemplares
Impreso en Colombia
Febrero de 2013

Sistemas agropastoriles: Un enfoque integrado para el manejo sostenible de Oxisoles de los Llanos Orientales de Colombia / editado por Edgar Amézquita, Idupulapati M. Rao, Mariela Rivera, Irlanda I. Corrales y Jaime H. Bernal. -- Cali, CO : Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT) ; Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural (MADR) de Colombia ; Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (Corpoica), 2013. 288 p. -- (Documento de Trabajo CIAT No. 223) ISBN 978-958-694-117-4

Descriptores AGROVOC:

1. Sistemas silvopascícolas. 2. Sistemas agropascícolas. 3. Sabanas. 4. Suelo ácido. 5. Manejo del suelo. 6. Conservación de suelos. 7. Capa arable del suelo. 8. Labranza. 9. Propiedades físico-químicas del suelo. 10. Deficiencias del suelo. 11. Biología del suelo. 12. Fertilidad del suelo. 13. Microorganismos del suelo. 14. Abonos. 15. Nitrógeno. 16. Fósforo. 17. Desarrollo agrícola. 18. Tecnología apropiada. 19. Mejora de pastizales. 20. Brachiaria. 21. Maíz. 22. Variedades. 23. Rehabilitación de tierras. 24. Manejo de praderas. 25. Coparticipación. 26. Evaluación del impacto. 27. Colombia.

Descriptores locales:

1. Llanos Orientales. 2. Orinoquia. 3. Oxisoles. 4. Pasturas tropicales. 5. Impacto económico. 6. Impacto de la investigación

Descriptores AGROVOC en inglés:

1. Silvopastoral systems. 2. Agropastoral systems. 3. Savannas. 4. Acid soils. 5. Soil management. 6. Soil conservation. 7. Top soil. 8. Tillage. 9. Soil chemico-physical properties. 10. Soil deficiencies. 11. Soil biology. 12. Soil fertility. 13. Soil microorganisms. 14. Fertilizers. 15. Nitrogen. 16. Phosphorus. 17. Agricultural development. 18. Appropriate technology. 19. Pasture improvement. 20. Brachiaria. 21. Maize. 22. Varieties. 23. Reclamation. 24. Grassland management. 25. Partnerships. 26. Impact assessment. 27. Colombia.

Descriptores locales en inglés:

1. Eastern plains. 2. Orinoquia. 3. Oxisols. 4. Tropical pastures. 5. Economic impact. 6. Research impact.

I. Amézquita, Edgar. II. Rao, Idupulapati M. III. Rivera, Mariela. IV. Corrales, Irlanda I. V. Bernal, Jaime H. VI. Centro Internacional de Agricultura Tropical. VII. Ser.

Categoría de materia AGRIS: P30 Ciencia del suelo y manejo del suelo

Clasificación LC: S 633 .5 .C6 S5

Derechos de Autor © CIAT 2013. Todos los derechos reservados

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

Contenido

	Página	
Prólogo	vii	
Prefacio	ix	
PARTE I		
Contexto		
Capítulo		
1	Las sabanas de los Llanos Orientales de Colombia: Caracterización biofísica e importancia para la producción agropecuaria <i>M. Rivera, E. Amézquita, J. H. Bernal e I. M. Rao</i>	3
2	Condiciones climáticas de la altillanura plana colombiana en el contexto de cambio climático <i>J. H. Bernal, A. J. Peña, N. C. Díaz y D. Obando</i>	14
3	Propiedades físicas de los suelos de los Llanos Orientales y sus requerimientos de labranza <i>E. Amézquita</i>	29
4	Culticore, ensayo de largo plazo para el desarrollo de sistemas de producción sostenibles en suelos ácidos de sabanas <i>D. Friesen, E. Amézquita, I. M. Rao y J. H. Bernal</i>	52
PARTE II		
Sistemas Agropastoriles		
5	Caracterización biofísica de sistemas en monocultivo y en rotación en Oxisoles de los Llanos Orientales de Colombia <i>M. Rivera y E. Amézquita</i>	69
6	Evaluación del modelo de simulación de crecimiento CERES aplicado a la variedad de maíz (<i>Zea mays</i> L.) Sikuaní V-110 en suelos ácidos de sabanas <i>M. Rivera y E. Amézquita</i>	87

Capítulo	Página	
7	Evaluación de insectos plaga y benéficos en cultivos en rotación en suelos ácidos de sabanas <i>L. D. Ayala, I. I. Corrales y E. Amézquita</i>	100
8	Establecimiento de sistemas agropastoriles y su efecto en el rendimiento de cultivos en suelos ácidos de sabanas <i>M. Rivera, E. Amézquita, I. M. Rao, I. I. Corrales y L. F. Chávez</i>	119
9	Adquisición y reciclaje de fósforo en sistemas de cultivos y pasturas en suelos tropicales de baja fertilidad <i>D. K. Friesen, I. M. Rao, R. J. Thomas, A. Oberson y J. I. Sanz</i>	147
10	Destinos del fósforo aplicado como fertilizante en Oxisoles de los Llanos Orientales de Colombia: Fraccionamiento secuencial <i>G. Borrero, D. Friesen, A. Oberson, M. Rodríguez e I. M. Rao</i>	159
11	Efecto de sistemas de labranza en el rendimiento de maíz en un Oxisol de la sabana colombiana: Fraccionamiento de materia orgánica y fósforo del suelo <i>T. A. Basamba, E. Barrios, E. Amézquita, I. M. Rao y B. R. Singh</i>	166
12	Dinámicas de nitrógeno en monocultivos y cultivos en rotación en Oxisoles de los Llanos Orientales de Colombia <i>D. Friesen, R. Thomas, M. Rivera, N. Asakawa y W. Bowen</i>	189
13	Mejoramiento de Oxisoles de baja fertilidad para sistemas agropastoriles de alta productividad en sabanas tropicales de Colombia <i>E. Amézquita, I. M. Rao, M. A. Rondón, M. A. Ayarza, P. Hoyos, D. L. Molina e I. I. Corrales</i>	198
14	Impacto de los organismos del suelo en la diversidad vegetal y la abundancia: Estudio de caso de una especie nativa de lombriz de tierra anécica <i>J. J. Jiménez, R. Thomas, M. Fisher, N. Asakawa, T. Decaëns, P. Lavelle y L. Mariani</i>	219

PARTE III**Impacto Económico de las Investigaciones en Culticore**

Capítulo

- | | | |
|----|--|-----|
| 15 | Análisis económico de una estrategia para el manejo de suelos en la altillanura colombiana: Construcción de la capa arable
<i>L. Rivas, E. Amézquita, P. Hoyos y D. L. Molina</i> | 233 |
|----|--|-----|

PARTE IV**Conclusiones y Perspectivas**

- | | | |
|----|--|-----|
| 16 | La investigación que logró los productos de desarrollo de las actividades del CIAT y de sus socios colaboradores en los Llanos de Colombia
<i>M. Rivera, E. Amézquita, J. H. Bernal e I. M. Rao</i> | 269 |
|----|--|-----|

Apéndice

- | | | |
|---|---|-----|
| 1 | Publicaciones y eventos relacionados: Artículos en revistas y libros, tesis, pósteres, cursos, talleres, seminarios, congresos y reportes | 277 |
| 2 | Acrónimos usados en el texto | 287 |

Prólogo

El gran desafío de la producción de alimentos en la actualidad es encontrar la manera de lograr un adecuado balance entre la competitividad económica, la equidad social y la sostenibilidad ambiental. Esta filosofía, en el contexto de la investigación agropecuaria, ha sido definida como agricultura eco-eficiente. En este sentido, la propuesta tecnológica desarrollada en el denominado Ensayo Culticore (ensayo de largo plazo para integrar cultivos con pasturas mejoradas para la producción sostenible agropecuaria y para mejorar la productividad de los suelos ácidos) hace parte de las opciones para mejorar la eco-eficiencia, ya que involucra componentes tales como el desarrollo de sistemas de manejo de suelo, que integra ganadería con cultivos para maximizar el reciclaje de nutrientes y minimizar sus pérdidas; la adopción de sistemas de labranza de conservación, que reducen considerablemente la dependencia de los recursos no renovables y, por último, el uso de insumos biológicos. El uso más eficiente de los recursos está basado en la siembra de germoplasma adaptado a las condiciones específicas de la zona, la comprensión de los procesos físicos, químicos y biológicos del suelo y de las condiciones microclimáticas, como también en la aplicación de bioproductos y el manejo de buenas prácticas agrícolas y ganaderas basadas en recomendaciones técnicas, y en la vinculación de conocimientos y tecnología, como una alternativa integral para optimizar la productividad, al tiempo que se preserva el medio ambiente.

El Convenio de cooperación técnica y científica para el desarrollo sostenible y competitivo de la Orinoquia colombiana, suscrito entre el Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural (MADR), la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (Corpoica) y el Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), inició en marzo de 2011. Esta alianza estratégica busca aprovechar al máximo la capacidad científica del CIAT, uno de los 15 centros del Consorcio CGIAR, y de Corpoica, principal ente de investigación agropecuaria del país, con el objeto de desarrollar y validar tecnologías para el mejoramiento de la productividad y la sostenibilidad de los sistemas de producción agropecuarios de la altillanura plana. Una de las áreas de trabajo de este Convenio ha sido el fortalecimiento del conocimiento a través de la difusión de los productos tecnológicos generados en la región.

En esta publicación, los autores presentan el potencial para la utilización de los sistemas agropastoriles y las oportunidades reales para ampliar la frontera agrícola del país, sin poner en riesgo la sostenibilidad de los ecosistemas.

Aprovechamos la oportunidad para agradecer a los investigadores que, mediante su dedicación y esfuerzo, contribuyeron con esta publicación que, sin duda alguna, servirá como referente para la región como un producto del trabajo colaborativo entre instituciones, en el contexto

de alianzas estratégicas para la investigación, desarrollo tecnológico e innovación, que ha permitido integrar y articular capacidades en talento humano, infraestructura y equipamientos, para optimizar procesos y generar soluciones integrales al sector productivo.

Rubén A. Valencia Ramírez
Director Centro de Investigación
La Libertad-Corpoica

Elcio Perpétuo Guimarães
Director de Investigación para América Latina
y el Caribe-CIAT

Prefacio

Las sabanas de América Latina tropical representan una de las grandes extensiones de tierra con potencial para la producción agrícola y ocupan alrededor de 250 millones de hectáreas. Las sabanas colombianas, ubicadas en los Llanos Orientales, geográficamente pertenecen a la región de la Orinoquia o cuenca del río Orinoco, ocupan 17 millones de hectáreas en los departamentos del Meta, Vichada y Casanare y se constituyen en una de las mayores reservas para la expansión inmediata de la frontera agrícola y ganadera. Las sabanas están dotadas de una topografía de suelos favorable para la mecanización; sin embargo, los ecosistemas de esta región son generalmente frágiles y su funcionamiento es complejo, por lo que se requieren sistemas de manejo apropiados para superar una serie de restricciones que dificultan su explotación agropecuaria, entre las que se destacan la distribución pluviométrica (una prolongada época seca y veranillos entre la época lluviosa), la baja fertilidad de los suelos en función de la alta toxicidad de aluminio (Al), la alta adsorción de fósforo (P), la alta densidad aparente, la reducida capacidad de retención de humedad, la elevada susceptibilidad a erosión y la alta incidencia de plagas y enfermedades.

Iniciativas y esfuerzos para superar esta serie de limitantes se han realizado desde hace más de 4 décadas por organismos internacionales, el sector público y el sector privado. Cabe destacar trabajos de investigación realizados y/o financiados por el Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (Corpoica), la Universidad de los Llanos, el Centro de Cooperación Internacional en Investigación Agrícola para el Desarrollo (Cirad), el Centro Internacional de Desarrollo de Fertilizantes (IFDC), el Instituto de Investigación para el Desarrollo (IRD; *anteriormente*, la Oficina de la Investigación Científica y Técnica de Ultramar, ORSTOM), la Universidad Complutense de Madrid, el Instituto Federal Suizo de Tecnología Zurich (ETH), el Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo (CIMMYT), la Universidad de Rouen, el Departamento Administrativo de Ciencia, Tecnología e Innovación (Colciencias), el Programa Nacional de Transferencia de Tecnología Agropecuaria (PRONATTA) y el Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural (MADR). Dichos trabajos de investigación han contribuido a la generación de tecnología apropiada para las sabanas y una consecuente formulación de sistemas de producción para las diferentes áreas, con el objetivo final de una utilización plena de los recursos existentes en la región, en busca de una mayor producción de alimentos, con el gran desafío en la preservación de los recursos naturales y la sostenibilidad de la producción agrícola y ganadera. Como resultado de estas investigaciones se han publicado los siguientes libros:

- *Sistemas Agropastoriles en Sabanas Tropicales de América Latina*, donde se presentan las experiencias adquiridas, el potencial de los sistemas agropastoriles y las oportunidades futuras para explorar en forma eficiente y sostenible este ecosistema, preservando los recursos naturales.

- *Agroecología y Biodiversidad de las Sabanas en los Llanos Orientales de Colombia*, el cual presenta una caracterización biofísica de las sabanas y, con especial énfasis, en la riqueza fitogenética; también identifica normas mínimas de compatibilidad entre el uso productivo de las sabanas y el mantenimiento de la diversidad de especies y comunidades.
- *El Arado Natural: Las Comunidades de Macroinvertebrados del Suelo en las Sabanas Neotropicales de Colombia*, el cual muestra resultados de una serie de estudios sobre el papel de la macrofauna del suelo y, en particular, de las lombrices de tierra en ecosistemas naturales y sistemas de producción agrícola, enfocado al mejoramiento de la actividad biológica y optimización del uso de nutrientes a través de su reciclaje en el suelo.

La actual publicación, *Sistemas Agropastoriles: Un Enfoque Integrado para el Manejo Sostenible de Oxisoles de los Llanos Orientales de Colombia*, editado por Edgar Amézquita, Idupulapati M. Rao, Mariela Rivera, Irlanda I. Corrales y Jaime H. Bernal, recopila los resultados más destacados de las investigaciones realizadas en el Ensayo de Largo Plazo denominado Culticore, establecido en el Centro Nacional de Investigación (CNI) en Carimagua, Llanos Orientales de Colombia, entre 1993 y 2002. Esta publicación se compone de cuatro partes:

- La Parte I proporciona el contexto que incluye la caracterización e importancia de la región y la descripción detallada del Ensayo Culticore.
- La Parte II introduce los sistemas agropastoriles, relaciona resultados que incluyen reciclaje de nutrientes (N, P y MO), condiciones físico-químicas y biológicas del suelo, rendimiento y simulación de crecimiento de cultivos e inventario de plagas y enfermedades.
- La Parte III examina el impacto económico de las investigaciones.
- La Parte IV presenta las conclusiones e identifica las perspectivas de la investigación para la región. Se espera que las experiencias, logros y avances aquí presentados, sobre las prácticas de manejo más convenientes obtenidas de investigaciones conjuntas entre el CIAT y Corpoica para el desarrollo sostenible del sector agrícola, sean de utilidad para investigadores, técnicos, estudiantes y productores del sector agropecuario de los Llanos Orientales de Colombia.

La solución encontrada para manejar estos suelos, con el fin de que sean productivos y sostenibles, fue desarrollar en ellos una capa arable mediante la labranza vertical (con cinceles) para corregir ciertas condiciones físicas, agregarles cal y fertilizantes para enmendar sus condiciones químicas y sembrar en ellos, como componentes de la pastura, especies forrajeras y especies cultivadas mejoradas que se adapten a esas condiciones del suelo. De este modo, el

fertilizante y las enmiendas agregadas promueven un crecimiento vigoroso de las raíces de las gramíneas en la pastura, que permiten aumentar la fijación del carbono atmosférico (por 'secuestro') en las capas profundas del suelo, así como reducir la nitrificación y la emisión de óxidos nitrosos desde el suelo, impulsar la actividad biológica del suelo y estabilizar su estructura física.

Si los agricultores desarrollan la idea del establecimiento de una capa arable y combinan esta tecnología de manejo del suelo, ya sea con cultivares de especies de forrajes y de cultivos adaptados a suelos ácidos en sistemas agropastoriles o ya con componentes arbóreos en sistemas silvopastoriles, tendrán (los agricultores) los instrumentos y la tecnología para *transformar las sabanas colombianas*, elevando así la productividad agrícola y mitigando además el cambio climático.

Aunque el objetivo general de la investigación que se hace en las sabanas latinoamericanas es mejorar, frente al cambio climático, la eco-eficiencia de los sistemas de ganado y cultivos, el principal desafío que se enfrenta es *impulsar a los líderes nacionales y a la comunidad internacional* a que sigan apoyando los esfuerzos que hace la investigación para lograr el desarrollo sostenible de estas sabanas de suelos ácidos.

Esta publicación fue posible gracias al apoyo financiero del MADR y a las investigaciones conjuntas realizadas entre Corpoica y el CIAT, mediante el Convenio MADR-Corpoica-CIAT.

Edgar Amézquita
Idupulapati M. Rao
Mariela Rivera
Irlanda I. Corrales
Jaime H. Bernal

PARTE I

Contexto

CAPÍTULO 1

Las Sabanas de los Llanos Orientales de Colombia: Caracterización Biofísica e Importancia para la Producción Agropecuaria

M. Rivera¹, E. Amézquita², J. H. Bernal³ e I. M. Rao⁴

Resumen

Las sabanas tropicales del mundo ocupan cerca del 43% de la tierra cultivable; de esta extensión, el 27% está localizada en América tropical y marca una importante frontera para expandir la frontera agrícola, mediante sistemas que integren la ganadería y la agricultura. Las sabanas de América del Sur cubren, aproximadamente, 270 millones de hectáreas (Mha), de las cuales 17 Mha están ubicadas en los Llanos Orientales de Colombia, entre los diferentes paisajes que componen el ecosistema de sabanas. Los suelos bien drenados de la altillanura plana, que cubren alrededor de 4.6 Mha, se encaminan a una intensificación de la producción agropecuaria similar a la que se realizó en los Cerrados de Brasil, aunque a escala menor, debido a limitaciones en infraestructura, acceso a insumos y maquinaria. En la región predominan los Oxisoles y Ultisoles, caracterizados por presentar baja fertilidad debido a su estado avanzado de meteorización. Aunque se presentan condiciones favorables para la explotación agrícola, como son pluviosidad, temperatura y una topografía apta para la mecanización, su productividad está restringida, además de la baja fertilidad por la alta acidez y toxicidad por Al intercambiable. Desde el punto de vista físico, los suelos son frágiles, susceptibles a la compactación, erosión y sellamiento superficial, presentan baja infiltración y baja capacidad de almacenamiento de agua y alta densidad aparente. La vegetación nativa dominante se caracteriza por una escasa diversidad, debido a que pocas especies se adaptan a las severas limitaciones de suelo y condiciones ambientales; como consecuencia, la productividad animal en la región es muy baja. La rápida expansión de sistemas en monocultivo para producción de granos y pasturas sin el manejo adecuado dio como resultado la pérdida de productividad y degradación del suelo. En la Orinoquia, más del 85% del suelo disponible está bajo ganadería extensiva, actividad que genera un empleo directo por cada 61 ha. El cultivo predominante es el arroz, seguido de la palma de aceite, los cuales

-
1. Física de suelos/Agronomía, Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), Cali, Colombia. m.rivera@cgiar.org
 2. Física de suelos, Consultor Internacional. eamezquitac@gmail.com
 3. Fisiología vegetal, Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (Corpoica), C.I. La Libertad, Villavicencio, Colombia. jhbernal@corpoica.org.co
 4. Fisiología y Nutrición de plantas, CIAT. i.rao@cgiar.org

producen alrededor del 30% de la producción nacional de arroz paddy y aceite de palma, respectivamente, y que generan un empleo por cada 6 ha.

Palabras claves: altillanura plana, Oxisoles, desarrollo agrícola, economía regional

Generalidades

Las sabanas tropicales son uno de los más importantes biomas del mundo, y ocupan aproximadamente 20% de la superficie en América del Sur, África, Asia y Australia (Silva y Bates, 2002; López-Hernández et al., 2005). Las sabanas neotropicales de América del Sur comprenden cerca de 270 millones de hectáreas: 76% en Brasil, 11% en Venezuela, 5% en Colombia, 5% en Bolivia y 1.5% en Guyana (Cochrane, 1990; Rippstein et al., 2001). Debido a sus características topográficas y de clima, este macrosistema es considerado una de las últimas fronteras para la ampliación de la producción agropecuaria en el mundo (Borlaug y Dowswell, 1994). Las sabanas colombianas, ubicadas en los Llanos Orientales, geográficamente pertenecen a la región de la Orinoquia o cuenca del río Orinoco, y ocupan alrededor de 17 millones de hectáreas en los departamentos del Meta, Vichada, Arauca y Casanare. Los ecosistemas en esta región son generalmente frágiles y su funcionamiento es complejo, por lo que requieren sistemas de manejo adecuados para su utilización (Amézquita et al., 1998); existe una amplia variedad de paisajes que incluyen altillanura plana, altillanura ondulada, serranía y bosques de galería. Las sabanas bien drenadas comprenden alrededor de 10 millones de hectáreas, cubiertas con vegetación de sabana natural. La altillanura plana, con 3.5 millones de hectáreas, y la altillanura ondulada y serranía, con una extensión aproximada de 6.5 millones de hectáreas, son los paisajes principales.

Unidades fisiográficas

La evolución y el desarrollo de la región de la Orinoquia están ligados con el origen de la megacuenca sedimentaria localizada entre el Escudo de la Guayana y el flanco este de la Cordillera Oriental. Predominan los depósitos cuaternarios de origen fluvial, las rocas sedimentarias del Terciario (areniscas, lodolitas y calizas) que reposan sobre sedimentitas del Cretáceo, Paleozoico y rocas cristalinas félsicas del Precámbrico; sobre estos materiales se desarrollan paisajes de piedemonte, extensas altiplanicies plioleístocénicas, con disección variable, planicies aluviales y eólicas parcialmente disectadas y cortadas por largos y estrechos valles aluviales recientes, asociados a grandes ríos. Los fallamientos sobre los cuales discurre el río Meta establecen dos subregiones claramente diferenciadas: la altillanura (altiplanicie) y la denominada Orinoquia inundable (Malagón, 2003).

La altillanura plana es una franja de 60 km de ancho, en promedio, que se extiende al sur del río Meta desde el municipio de Puerto López hasta el límite con Venezuela. Está formada principalmente por sedimentos aluviales del Pleistoceno primario a través de extensas áreas ligeramente elevadas y planas que alternan con zonas bajas y estrechas de forma alargada,

conocidas como 'bajos', que constituyen drenajes naturales y ocupan cerca del 10% de esta altillanura (Cochrane et al., 1985). Las zonas con pendientes inferiores a 1% ocupan más del 90% del área y se caracterizan por una vegetación de sabana con escasa presencia de árboles y arbustos.

La altillanura ondulada y la serranía son franjas extensas al sur de la altillanura plana, con un paisaje de colinas redondeadas, pendientes entre 1 y 30% y zonas bajas y húmedas que ocupan alrededor del 25% del área.

Los bajos, que conforman el sistema de drenaje de ambos tipos de altillanura, son valles constituidos por vertientes amplias, suavemente inclinadas, de fondo plano, por donde generalmente corre un río o cauce conocido como 'caño'. Estos caños pueden tener corrientes de agua permanente o intermitente según su caudal, y son importantes como abrevaderos para el ganado. Constituyen importantes reservas *in situ* de plantas forrajeras, ya que por su alto nivel freático permiten el crecimiento de éstas durante la época seca, mientras que durante la época lluviosa permanecen saturados de agua o inundados.

Los bosques de galería, que surcan tanto la altillanura plana como la ondulada y la serranía, crecen en los bordes de caños y ríos. Con frecuencia su ancho es solo de algunos cientos de metros, y rara vez miden 1 km. La exuberante vegetación de árboles de hoja ancha y de algunas palmeras en estos bosques se debe a la mayor humedad, así como también a las propiedades físico-químicas y biológicas favorables del suelo.

Los morichales están formados por la palma de moriche (*Mauritia minor*) que crece y se desarrolla en grupos largos y angostos al lado de los caños que corren sobre los suelos húmedos (bajos), en las orillas de los esteros o en los bordes de las lagunas.

La Orinoquia mal drenada está localizada al norte, desde la margen izquierda del río Meta hasta el río Arauca, que define la frontera con Venezuela, y presenta un paisaje de bajos inundables mal drenados con alrededor de 5 millones de hectáreas, que comprende los subpaisajes llanura de desborde y llanura eólica.

La llanura aluvial de desborde presenta un relieve plano en el que sobresalen los bancos, que son diques naturales de los cauces de agua. Según su posición en el dique, los suelos varían desde Quartzipsamments, pasando por Dystropepts, hasta Tropaquepts (IGAC, 1991).

La llanura eólica se superpone a la llanura de desborde y en las áreas más arenosas presenta suelos Quartzipsamments. Las partes que contienen mayor cantidad de limos se clasifican como Dystropepts, y las áreas de mayor presión como Aquepts (IGAC, 1991).

Clima

Las sabanas neotropicales son generalmente macrotérmicas y se desarrollan bien en zonas de climas estacionales, principalmente tropical húmedo tipo Aw (Koppen), donde las épocas lluviosa y seca son marcadamente contrastantes. La precipitación promedio anual varía entre 800 y 2500 mm, con un período seco que incrementa a medida que se aleja de los Andes (Cochrane, 1990; López-Hernández et al., 2005; Huber, 2007).

La región se encuentra entre 100 y 300 m.s.n.m.; la humedad relativa alcanza 80% durante la época lluviosa y entre 50 y 60% durante la época seca. La evaporación potencial es alta al final de la época seca entre diciembre y marzo, cuando el agua almacenada en el suelo disminuye a valores mínimos, particularmente durante febrero y marzo. En la zona predominan los vientos alisios cuya dirección es noreste-suroeste, con velocidades promedio de 2 a 3 m/seg.

La denominación de sabanas isohipertérmicas significa que estas zonas tienen un promedio de temperatura mayor a 23.5 °C a través del año, que se asocia con un régimen ústico-údic de humedad en el suelo, aunque en los sitios bajos el régimen es ácuico. No obstante, la precipitación es el factor climático crítico, que si bien alcanza valores por encima de 2000 mm, se concentra en 8 meses del año, siendo secos los 4 meses restantes. Debido a la baja capacidad de almacenamiento, durante la época seca ocurre una severa deficiencia de agua en el suelo, lo que afecta en forma severa el crecimiento de las plantas.

Geomorfología y suelos

Las sabanas tropicales son el resultado de la evolución de diversos procesos geológicos; entre ellos, las fuerzas tectónicas, la sedimentación, la erosión y los cambios climáticos drásticos. Las sabanas en esta región presentan una gran variabilidad geológica y topográfica, debido a la interacción entre la geomorfología, el tipo de material original de la corteza terrestre y el clima. El levantamiento final de la Cordillera Oriental ocurrió durante el Pliopleistoceno y, simultáneamente, los sedimentos desprendidos de ella se depositaron en la región actualmente ocupada por los Llanos Orientales. Las lluvias, que en la última glaciación del Cuaternario fueron abundantes, abrieron profundos cauces y transportaron enormes cantidades de sedimentos que se acumularon en las partes baja y plana, proceso que dio origen a la actual topografía y a los numerosos ríos que se observan en los Llanos Orientales de Colombia (IGAC, 1991).

En la región predominan Oxisoles y Ultisoles (Soil Survey Staff, 1994), que se caracterizan por presentar baja fertilidad, debido a su estado avanzado de meteorización y lixiviación, como consecuencia de los altos regímenes de precipitación y la alta permeabilidad. Los Oxisoles presentan una mineralogía dominada por arcillas de escasa actividad, baja capacidad de intercambio catiónico y alta acidez, condiciones que están asociadas con toxicidad por Al y, en

algunos casos, por Mn. El P se considera como el elemento más limitante en suelos ácidos; el contenido de P total en la región varía entre 200 y 600 mg/kg de suelo, mientras que el P disponible para las plantas varía entre 1 y 3 mg/kg, determinado por Bray II (Botero, 1989; Rao et al., 1999).

Los suelos de la altillanura plana presentan un excelente drenaje natural, aunque se pueden observar algunas zonas deprimidas, ligeramente cóncavas y mal drenadas. Son suelos profundos, bien estructurados, muy porosos y permeables, clasificados como Typic Haplustox Isohipertérmicos caoliníticos. Estos suelos tienen las características típicas de una formación resultante de condiciones de temperatura alta y continua, exceso de humedad en la época lluviosa y una alta concentración de óxidos de hierro y aluminio. La continua pérdida de minerales esenciales de fácil intemperismo causado por lixiviación origina el alto grado de acidez del suelo. La alternancia entre las condiciones de humedad y sequía genera procesos de gleyzación o formación de laterita, los cuales se manifiestan por cambios de coloraciones gris, amarillo o rojizo en el perfil del suelo y por la presencia de capas continuas de plintita, que al quedar expuesta al aire sobre la superficie se transforma en laterita (IGAC, 1991).

Los suelos de la altillanura ondulada y la serranía son generalmente pedregosos, debido a la abundancia de plintita y cantos rodados de cuarzo; su fertilidad es tan baja como en los suelos de la altillanura plana. Los suelos de los 'bajos' generalmente tienen mayores contenidos de materia orgánica y capacidad de intercambio catiónico, aunque son deficientes en la mayoría de nutrientes esenciales y comúnmente son clasificados como Inceptisoles. Los bosques de galería tienen suelos con mejor fertilidad; los morichales presentan suelos deficientes en oxígeno, constantemente saturados de agua y superficialmente endurecidos durante la estación seca (IGAC, 1991).

Vegetación nativa

La vegetación nativa dominante en la sabana se caracteriza por una escasa variedad botánica, debido a que pocas especies se adaptan a las severas limitaciones de fertilidad del suelo y condiciones ambientales. Las especies de gramíneas nativas más comunes son *Trachypogon vestitus*, *T. plumosus*, *T. ligularis*, *Axonopus purpusii*, *Leptocoryphyum lanatum*, *Paspalum pectinatum* y *P. plicatulum*. La baja calidad nutritiva de las gramíneas nativas es una condición difícil de superar, debido a que estas especies, por su rusticidad y su adaptación a la acidez y baja fertilidad del suelo, presentan una escasa respuesta a la aplicación de fertilizantes. Como consecuencia de la baja calidad del forraje de las gramíneas nativas y las fluctuaciones en disponibilidad, la productividad animal en la región es muy baja (Botero, 1989). El Chaparro (*Curatela americana*) y el Peralejo (*Byrsonima crassifolia*) son las especies arbustivas dominantes en las zonas no hidromórficas (Malagón, 2003).

El aporte de biomasa es escaso (2.2 a 3.8 t/ha por año) en sabanas herbáceas (Rao et al., 2001), pero puede incrementarse a 28 t/ha por año o más, bajo otras coberturas en función del

régimen de lluvias, longitud de la estación seca y los nutrientes disponibles (Lamotte, 1987). Dicho aporte explica, de manera general, un horizonte ócrico en la superficie de los suelos, el cual aumenta su contenido en materiales orgánicos, a medida que se establece la transición a las zonas con mayor precipitación o a aquellas bajas y a los esteros, en los que la formación vegetal asociada al “bosque de galería” aporta mayor biomasa, se incrementan radicalmente los contenidos de humedad y los suelos presentan horizontes úmbricos o hísticos. En la altillanura, el tipo de humus es el mull ácido tropical, con composiciones promedio de ácidos fúlvicos a ácidos húmicos superiores a 1.2; su contenido en humina es inferior a 50%, salvo en zonas con recubrimientos eólicos donde supera el 60% (De Becerra, 1986); la humificación supera el 80% en la altillanura poco disectada (Andreux y De Becerra, 1975) y 40–60% en la disectada (De Becerra, 1986).

Macrofauna en el suelo

La distribución dominante de la macrofauna en el suelo sigue un patrón específico en el cual las lombrices (*Lumbricus* sp.) dominan en las zonas bajas, los cucarrones (coleópteros) en las zonas de transición y las hormigas (himenópteros) en las zonas altas. La ubicación de dichos organismos está correlacionada con sus requerimientos, de tal forma que las lombrices se encuentran en zonas húmedas y ricas en materiales orgánicos, las hormigas en suelos arenosos, mientras que las termitas (isópteros) abundan en suelos arcillosos. El drenaje influye sobre la población de organismos; bajo el efecto de drenaje favorable se presenta mayor diversidad biológica, contrario a lo que sucede en condiciones de inundación. La composición típica de la fauna en el suelo a nivel de familias es: Formicidae, Termitidae, Carabidae, Staphylinidae, Blattidae, Japygidae, Compodeidae y Cyndyidae (Malagón, 1987).

Estudios de Decaëns et al. (2001) mostraron que las sabanas y los bosques de galería presentan alta riqueza taxonómica y alta densidad de poblaciones (en promedio, 4293 y 2830 individuos/m²), respectivamente, con una biomasa promedio (13.6 y 15.3 g/m²). Las termitas y las lombrices, consideradas los mayores componentes de la biomasa, representan el 47 y 31%, respectivamente; otros resultados de Decaëns et al. (2001) han mostrado que las comunidades de macroinvertebrados de las pasturas mejoradas se caracterizaron por una alta biomasa y alta riqueza taxonómica y una densidad de población media; además, asociaciones de pastos africanos y leguminosas presentaron mayor biomasa de lombrices (4.8 a 51.1 g/m²), equivalente a 4 y 10 veces mayor que la sabana nativa. Las poblaciones de lombrices bajo pasturas estuvieron compuestas de especies nativas con una gran diversidad de macrofauna, representada en 26 a 32 unidades taxonómicas. Sistemas de cultivos (arroz y yuca) presentaron menor biomasa (3.2 y 4.3 g/m²) y menor densidad (429-592 individuos/m²) y baja riqueza taxonómica (18 unidades taxonómicas). Las comunidades de lombrices en las sabanas bien drenadas de Colombia son muy sensibles a cambios ambientales asociados con la intensificación de la agricultura (Jiménez, 2001).

Decaëns et al. (2001) presenta tres tipos de agroecosistemas y sus efectos en la macrofauna:

- *Pasturas de sabana nativa, bajo ganadería extensiva:* donde los efectos en la macrofauna son poco significativos, con re-colonización después del manejo tradicional de quema rápida. Las lombrices son favorecidas por el tipo de pastoreo y el fuego, pero su importancia disminuye con el sobrepastoreo. Las termitas responden en direcciones claramente opuestas y la relación lombrices/termitas puede ser considerada como un indicador del estado ambiental.
- *Pasturas introducidas:* favorece los principales componentes del grupo de los macroinvertebrados. La siembra de pasturas con leguminosas y la producción animal mejorada tiene un impacto muy importante en la macrofauna, especialmente en las poblaciones de lombrices que incrementan su masa de 4.8 a 51.1 g/m². El mejoramiento de la calidad de hojarasca y la gran cantidad de desechos del suelo, producto de los animales en pastoreo, explican esos resultados.
- *Cultivos anuales:* tienen un efecto dramático en las poblaciones de lombrices y artrópodos con una drástica disminución de la biomasa, densidad de poblaciones y riqueza taxonómica. Los factores responsables de este fenómeno están relacionados con prácticas agrícolas como la labranza, aplicación de fertilizantes o agroquímicos, en la reducción de producción de raíces y la modificación de las condiciones microclimáticas que ocurren después de eliminar la vegetación natural. La pérdida de la abundancia y diversidad de las comunidades bajo cultivos anuales resulta invariablemente en la pérdida de ciertas funciones importantes del suelo (Lavelle, 1996; Giller et al., 1997).

Evolución de las estrategias de investigación en sabanas

Inicialmente, las investigaciones del Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT) en las sabanas de los Llanos Orientales de Colombia fueron enfocadas al uso de germoplasma forrajero adaptado a suelos ácidos de baja fertilidad, con el objetivo de sustituir las pasturas nativas de baja calidad por pasturas mejoradas del género *Brachiaria*. En esa época, el entendimiento del impacto del recurso en la producción fue poco enfatizado. Igualmente, los mecanismos de degradación de los recursos y el mejoramiento bajo diferentes sistemas, incluyendo cultivos y forrajes, recibieron poca atención. No obstante, posteriormente las actividades de investigación comenzaron a definir las relaciones en los sistemas suelo-agua-planta-animal que permitieron identificar los lineamientos y las señales de alerta temprana para la estabilidad y el desarrollo del ecosistema.

A comienzos de 1989, la estrategia de investigación en sabanas tomó una nueva dirección, cuando los Programas de Arroz y de Pasturas Tropicales comenzaron a desarrollar el

concepto de sistemas agropastoriles. Este nuevo enfoque se basó en la tecnología de pasturas mejoradas y adaptadas en estos ecosistemas y sus asociaciones con los nuevos desarrollos de líneas de arroz tolerantes a suelos ácidos. El objetivo fue intensificar y diversificar el uso del suelo mediante la generación de flujo de caja, a través de la producción del arroz necesaria para mejorar el establecimiento y/o la recuperación de pasturas. En 1989, el CIAT estableció el primer ensayo de sistemas agropastoriles en la finca Matazul, combinando variedades recientemente liberadas de arroz con especies forrajeras introducidas y adaptadas, individuales o asociadas con leguminosas forrajeras. En 1993, en ensayos colaborativos CIAT-Corpoica, la investigación se orientó hacia el establecimiento de sistemas de producción experimentales de largo plazo, que incluyeron monocultivos, rotación de cultivos y sistemas agropastoriles en el Centro Nacional de Investigaciones (CNI) en Carimagua, Llanos Orientales de Colombia. Lo anterior dio origen al Ensayo de largo plazo denominado Culticore, que fue apoyado en forma paralela por experimentos satélites diseñados para cuantificar procesos biofísicos, particularmente las dinámicas de N y P (Friesen et al., 1999).

Economía regional

La actividad agropecuaria era la base de la economía regional en la Orinoquia hasta finales de 1980, excepto para el departamento del Meta, que tenía explotaciones petroleras. A finales de la década siguiente, Casanare y Arauca incursionaron en la actividad petrolera; este último se convirtió en un departamento productor de gas, mientras que en el Meta y en Vichada el sector de servicios superó al sector agrícola (Viloria, 2009). El área cultivada de la Orinoquia pasó de 274,931 ha en 1996 a 430,205 ha en el 2007, mientras que en ese mismo período la producción creció en 51% (Viloria, 2009). El Meta y Casanare presentaban a la fecha 63 y 25%, respectivamente, del total del área cultivada en la región (Viloria, 2009).

La ganadería extensiva de carne ha sido una adaptación histórica a las condiciones de los ecosistemas regionales. En el 2008 se utilizaron 9.75 millones de hectáreas para sostener un inventario ganadero de 5,727,131 cabezas, equivalentes al 21.3% del total nacional (26,877,824 cabezas). La ganadería extensiva en la Orinoquia genera un empleo directo por cada 61 ha de pasturas (Viloria, 2009). La ganadería utiliza 87.38% del suelo disponible en el Meta (4.68 millones de hectáreas) y 88.97% del suelo disponible en Casanare (3.56 millones de hectáreas). Entre el 2001 y 2008, la capacidad de carga animal en el Meta, Casanare y Vichada fue de 1.8, 1.7 y 0.10 cabezas/ha, respectivamente. Estas diferencias se deben principalmente a razones de tipo tecnológico (Benavides, 2010).

En el 2007, el arroz ocupó la mayoría del área cultivada en la Orinoquia (136,207 ha) (Finagro, 2010a, citado por Benavides, 2010; SIID, 2011). En ese año se produjeron 751,330 t de arroz, equivalentes al 30% de la producción nacional (2,493,112 t). La mayoría del arroz producido en forma mecanizada en la Orinoquia en el 2007 fue de tipo seco, donde el Meta y Casanare conjuntamente representaron el 57.9% del total nacional (Finagro, 2010a, citado por Benavides, 2010). En ese mismo año, el rendimiento de arroz con riego en el Meta y en

Casanare fue de 5.64 y 5.79 t/ha, respectivamente, mientras que el promedio nacional fue de 6.68 t/ha; los rendimientos del arroz seco mecanizado en el Meta y Casanare fueron muy similares a los del arroz con riego (5.64 t/ha vs. 5.23 t/ha) y superiores al promedio nacional de 4.79 t/ha (Finagro 2010a, citado por Benavides, 2010; SIID, 2011). En Colombia, el arroz genera 0.14 empleos/ha (Viloria, 2009).

En el 2007, en el Meta y Casanare se sembró el 36% del área total y se produjeron 30.1% del total nacional de palma de aceite, oleaginosa de ciclo largo (Finagro, 2010b, citado por Benavides, 2010). Los rendimientos en estos departamentos fueron de 2675 kg/ha y 4492 kg/ha, respectivamente. En este caso, las diferencias de productividad se originan principalmente en las diferencias de fertilidad natural de los suelos. El promedio nacional fue de 3482 kg/ha. El Meta es el primer productor nacional de palma de aceite (Finagro, 2010b, citado por Benavides, 2010). En Colombia, la palma de aceite genera 0.16 empleos/ha (Viloria, 2009). En el 2007, la producción de soya en 23,529 ha fue de 42,725 t, de las cuales el 80% se produjo en el Meta. De acuerdo con los datos de Corpoica (2005), citado por Benavides (2010), esta leguminosa tiene un excelente potencial para dinamizar la agricultura sostenible de la Orinoquia. En esta región también se produjeron maíz (47,082 ha y 125,045 t), plátano (32,435 ha y 423,645 t) y yuca (15,275 ha y 191,028 t). Viloria (2009) estima, con base en los índices de empleo para los principales productos agrícolas comerciales, que estos productos generan alrededor de 78,500 empleos directos y 182,000 indirectos en un total de 391,000 ha. Aunque la Orinoquia tiene un área de 8.2 millones de hectáreas con aptitud forestal, en el 2007 se tenían solamente 4000 ha de reforestación comercial en el Meta y 12,500 ha en Vichada (Benavides, 2010).

Referencias

- Amézquita E; Friesen DK; Sanz JI. 1998. Indicadores de sostenibilidad: Parámetros edafoclimáticos y diagnóstico del perfil cultural. En: Guimarães EP; Sanz JI; Rao IM; Amézquita MC; Amézquita E, eds. *Sistemas agropastoriles en sabanas tropicales de América Latina*. Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), Cali, Colombia; Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa), Brasília, DF, Brasil. p 49–64.
- Andreux F; De Berra SP. 1975. Fraccionamiento y caracterización del material húmico en algunos suelos de sabana de la Orinoquia colombiana. En *investigaciones especiales en algunos suelos del Centro de Desarrollo Integrado “Las Gaviotas”, Comisaría de Vichada*. IGAC. Vol. XI, No. 7, p 63–84.
- Benavides J. 2010. El desarrollo económico de la Orinoquia, como aprendizaje y construcción de instituciones. *Debates Presidenciales*. CAF-Fedesarrollo. 40 p.
- Borlaug NE; Dowsell CR. 1994. Feeding a human population that increasingly crowds a fragile planet. En: *15th World Congress of Soil Science, 1994, Acapulco, Mexico*. Keynote lecture. International Society of Soil Science y Mexican Society of Soil Science, Acapulco, México. p 1–15.

- Botero R. 1989. Manejo de explotaciones ganaderas en las sabanas bien drenadas de los Llanos Orientales de Colombia. Serie Boletines Técnicos No. 2. Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), Programa de Pastos Tropicales, Cali, Colombia. 99 p.
- Cochrane TT. 1990. Diferenciación regional de los suelos en sabanas americanas. En: Sarmiento G, ed. Las sabanas americanas: Aspectos de su biogeografía, ecología y utilización. Fondo Editorial Acta Científica Venezolana, Caracas. p 99–124.
- Cochrane TT; Sánchez LG; Azevedo LG; Porras JA; Garver C. 1985. Land in tropical America. Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT); Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA); Centro de Pesquisa Agropecuária dos Cerrados (CPAC), Cali, Colombia. Vol. 1, 144 p.
- De Becerra SP. 1986. Comportamiento de la materia orgánica en suelos de la Orinoquia. Diagnóstico geográfico nororiente de Vichada. Instituto Geográfico Agustín Codazzi. Vol. 5.2, p 1–33.
- Decaëns T; Lavelle P; Jiménez JJ; Escobar G; Rippstein G; Schneidmadl J; Sanz J.I.; Hoyos P; Thomas RJ. 2001. Impact of land management on soil macrofauna in the Eastern Plains of Colombia. En: Jiménez JJ; Thomas RJ, eds. Nature's plow: Soil macroinvertebrate communities in the neotropical savannas of Colombia. Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), Cali, Colombia. p 19–41.
- Friesen D; Ayarza MA; Thomas RJ; Amézquita E; Sanz JI. 1999. Strategic systems research for the Latin American savannas. En: Fujisaka S, ed. Systems and farmer participatory research: Developments in research on natural resource management. Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), Cali, Colombia. p 30–49.
- Giller KE; Beare MH; Lavelle P; Izac A-MN; Swift MJ. 1997. Agricultural intensification, soil biodiversity and agroecosystem function. *Applied Soil Ecology* 6:3–16.
- Huber O. 2007. Sabanas de los llanos venezolanos. En: Stefano RD de; Aymard G; Huber O, eds. Catálogo anotado e ilustrado de la flora vascular de los llanos de Venezuela. Fundación para la Defensa de la Naturaleza (FUDENA); Fundación Empresas Polar; Fundación Instituto Botánico de Venezuela "Dr. Tobías Lasser" (FIBV), Caracas, Venezuela. p 73–86.
- IGAC (Instituto Geográfico Agustín Codazzi). 1991. Meta: Características geográficas. Bogotá, DC, Colombia. 142 p.
- Jiménez JJ; Moreno AG; Decaëns T; Lavelle P; Fisher MJ; Thomas RJ. 2001. Earthworm communities in native savannas and man-made pastures of the Eastern Plains of Colombia. En: Jiménez JJ; Thomas RJ, eds. Nature's plow: Soil macroinvertebrate communities in the neotropical savannas of Colombia. Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), Cali, Colombia. p 51–68.
- Lamotte M. 1987. El destino de la materia vegetal en los ecosistemas herbáceos tropicales. En: San José JJ; Montes R, eds. La capacidad bioproductiva de sabanas. Centro Internacional de Ecología Tropical (CIET), Caracas, Venezuela. p 1–77.

- Lavelle P. 1996. Diversity of soil fauna and ecosystem function. *Biology International* 33:3–16.
- López-Hernández D; Hernández-Hernández RM; Brossard M. 2005. Historia del uso reciente de tierras de las sabanas de América del Sur: Estudios de casos en sabanas del Orinoco. *Interciencia* 30(10):623–630.
- Malagón D. 1987. Geomorfología y suelos de sabanas: Aspectos genéticos y taxonómicos de algunos suelos de Terecay (Vichada), Colombia. En: San José JJ; Montes R, eds. *La capacidad bioproductiva de sabanas*. Centro Internacional de Ecología Tropical (CIET), Caracas, Venezuela. p 107–204.
- Malagón D. 2003. Ensayo sobre tipología de suelos colombianos – Énfasis en génesis y aspectos ambientales. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales* 27(104):319–341.
- Rao IM; Friesen DK; Osaki M. 1999. Plant adaptation to phosphorus–Limited tropical soils. En: Pessaraki M, ed. *Handbook of plant and crop stress*. Marcel Dekker, Inc., Nueva York, Estados Unidos. p 61–96.
- Rao I; Rippstein G; Escobar G; Ricaurte J. 2001. Producción de biomasa vegetal epígea e hipógea en las sabanas nativas. En: Rippstein G; Escobar G; Motta F, eds. *Agroecología y biodiversidad de las sabanas en los Llanos Orientales de Colombia*. Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), Cali, Colombia. p 198–222.
- Rippstein G; Escobar G; Motta F, eds. 2001. *Agroecología y biodiversidad de las sabanas en los Llanos Orientales de Colombia*. Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), Cali, Colombia. 302 p.
- SIID (Sistema Integral de Información Departamental). 2011. Análisis de cifras económicas. Departamento del Meta, primer semestre 2010 y 2011. Disponible en: http://www.siid.gov.co/site/fileadmin/user_upload/SIID/productos/ANALISIS_DE_CUENTAS_ECONOMICAS_2010__2011.pdf (citado 2 agosto 2012).
- Silva SJM; Bates JM. 2002. Biogeographic patterns and conservation in the South American Cerrado: A tropical savanna hotspot. *Bioscience* 52(3):225–234.
- Soil Survey Staff. 1994. *Keys to soil taxonomy*. Pocahontas Press, Blacksburg, VA, Estados Unidos.
- Viloria J. 2009. Geografía económica de la Orinoquia. Documentos de trabajo sobre economía regional No. 113. Banco de la República, Cartagena, Colombia. 88 p.

Condiciones Climáticas de la Altiplanura Plana Colombiana en el Contexto de Cambio Climático

J. H. Bernal¹, A. J. Peña², N. C. Díaz³ y D. Obando⁴

Resumen

El estudio de patrones históricos espacio-temporales de variables climáticas es crítico para ajustar adaptaciones frente al cambio climático actual y futuro. Con este objetivo se analizaron las tendencias de la precipitación, temperatura diurna y nocturna, brillo solar y déficit hídrico en el Centro Nacional de Investigación (CNI) en Carimagua, Llanos Orientales de Colombia, y en la estación meteorológica Las Gaviotas en Cumaribo (Vichada), y se determinó su relación frente a los fenómenos meteorológicos El Niño, La Niña y Neutro, en el período de tiempo comprendido entre 1980 y 2010. Las tendencias de las variables climáticas fueron analizadas en escalas: mensual, trimestral, total anual y multianual mediante la aplicación de la prueba no paramétrica de Mann-Kendall y el análisis de Sen en las estaciones pluviométricas localizadas en la altiplanura plana colombiana. En general, los valores de las series meteorológicas anuales no presentan tendencias significativas, es decir, no hay cambios en sus valores como consecuencia del transcurso del tiempo. No obstante, los análisis estacionales multianuales de las series de temperatura mínima promedio de la estación Las Gaviotas muestran que la temporada comprendida entre diciembre y febrero tiene, cada año, temperaturas mínimas más bajas. Según el análisis de Mann-Kendall, esta tendencia es significativa (95% de confianza) y se encuentra que la tasa de enfriamiento ocurrida en esta temporada durante los últimos 30 años fue de -0.20 °C por cada década (10 años), de tal forma que la temperatura mínima media de esta temporada ha sufrido cambios; pasó de 22 °C (1981–1990) a 21.5 °C (2001–2010). No obstante, esto puede estar asociado a la prevalencia de meses La Niña durante los últimos años. En la altiplanura, el efecto ejercido por los períodos de enfriamiento y calentamiento de las aguas superficiales del Pacífico no determinan cambios drásticos en los acumulados de lluvia anual, se observa que los años más lluviosos, se alternan con años secos siguiendo un patrón casi bianual.

-
1. Fisiología vegetal, Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (Corpoica), C.I. La Libertad, Villavicencio, Colombia. jhbernal@corpoica.org.co
 2. Agroclimatología, Centro Nacional de Investigaciones de Café (Cenicafé), Manizales, Colombia. andres.pena@cafedecolombia.com
 3. Agronomía/Climatología, Corpoica, C.I. La Libertad, Villavicencio, Colombia. ncdiaz@corpoica.org.co
 4. Fisiología vegetal/Forestería, Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín, Colombia. dobandob@unal.edu.co

Palabras claves: cambio climático, tendencia de variables climáticas, prueba de estacionalidad Mann-Kendall, Llanos Orientales de Colombia

Introducción

El clima de la Orinoquia colombiana, donde se encuentra la altillanura plana, está determinado por varios factores, entre los que se encuentran la latitud, los vientos alisios, el efecto del Caribe, la influencia del Océano Pacífico y la distancia a la Cordillera de los Andes. Estos factores determinan las variaciones en los valores medios mensuales (intraanual) y medios anuales (interanual) de los elementos del clima y hacen de esta zona una región húmeda o húmeda lluviosa, según la clasificación de de Martonne (Eslava et al., 1986c), con índices de aridez que oscilan entre 24 y 31, que corresponden al clima tropical lluvioso (o megatermal) de bosque (Ami) en el sistema de clasificación de Koeppen (Eslava et al., 1986a) y al cálido semihúmedo, según el sistema de clasificación de Caldas-Lang (Eslava et al., 1986b).

Variabilidad intraanual

La baja latitud (zona ecuatorial) determina la poca variación intraanual de las horas de luz solar diaria y de las temperaturas mínimas o nocturnas (Figura 1). Este hecho establece que la vegetación nativa no responda a los efectos del fotoperíodo, o que si lo hace sea supremamente sensible a la escasa diferencia existente entre el día más largo del año (21 de junio) y el más corto (21 de diciembre), la cual se calcula en 25 minutos (Smithsonian Institution, 1893).

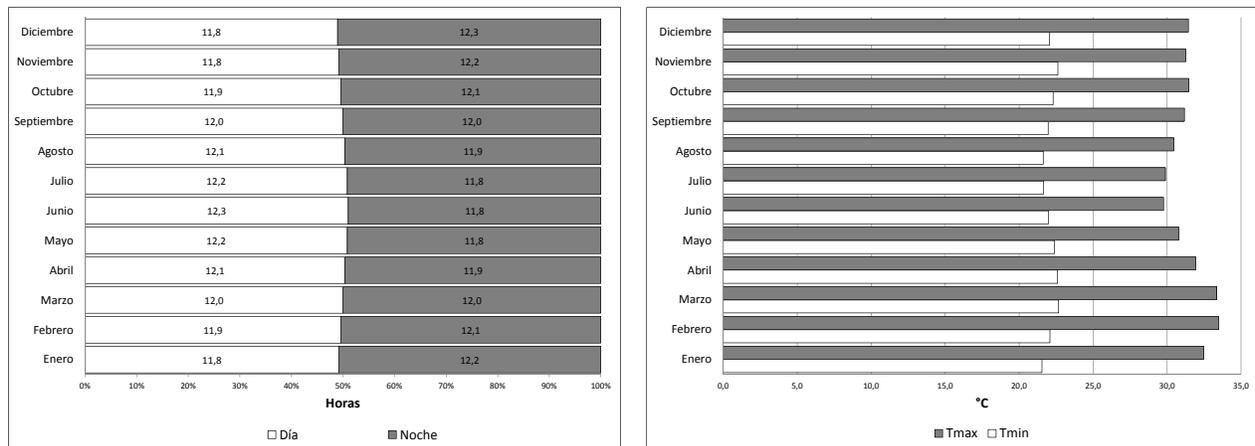


Figura 1. Variación intraanual de la longitud del día y de las temperaturas mínimas medias en la estación Carimagua, ubicada en la altillanura plana.

Como sucede en las zonas ecuatoriales, en las épocas en las que prevalecen días largos se presentan los días con menor brillo solar; esta condición se asocia al paso de la zona de convergencia intertropical (ZCIT), es decir, a la zona de encuentro de los vientos alisios del noreste y sureste. Básicamente se debe a que esta zona de bajas presiones y alta nubosidad tiene un movimiento meridional (sur-norte a principios de año y norte-sur a finales de año) que sigue el movimiento aparente del sol, con un retraso de aproximadamente 1 mes (León et al., 2000), que en la región determina la presencia de alta nubosidad entre los meses de abril y septiembre (Figura 2), cuando el sol se encuentra aparentemente en el hemisferio norte.

La mayor presencia de nubosidad durante esa época del año determina no solo una disminución del brillo solar y de la temperatura diurna (temperatura máxima media mensual), sino una mayor cantidad de lluvia (Figuras 1 y 3).

En ese sentido, el paso de la ZCIT define dos épocas climáticas contrastantes en el año: (1) una época seca, que va desde la última década (10 días) de noviembre hasta la primera década de abril, y (2) una temporada lluviosa, que va desde la segunda década de abril hasta la segunda década de noviembre. Además de esto, las épocas de déficit hídrico marcado (diciembre a marzo) se asocian con las mayores temperaturas máximas, que ocurren en los

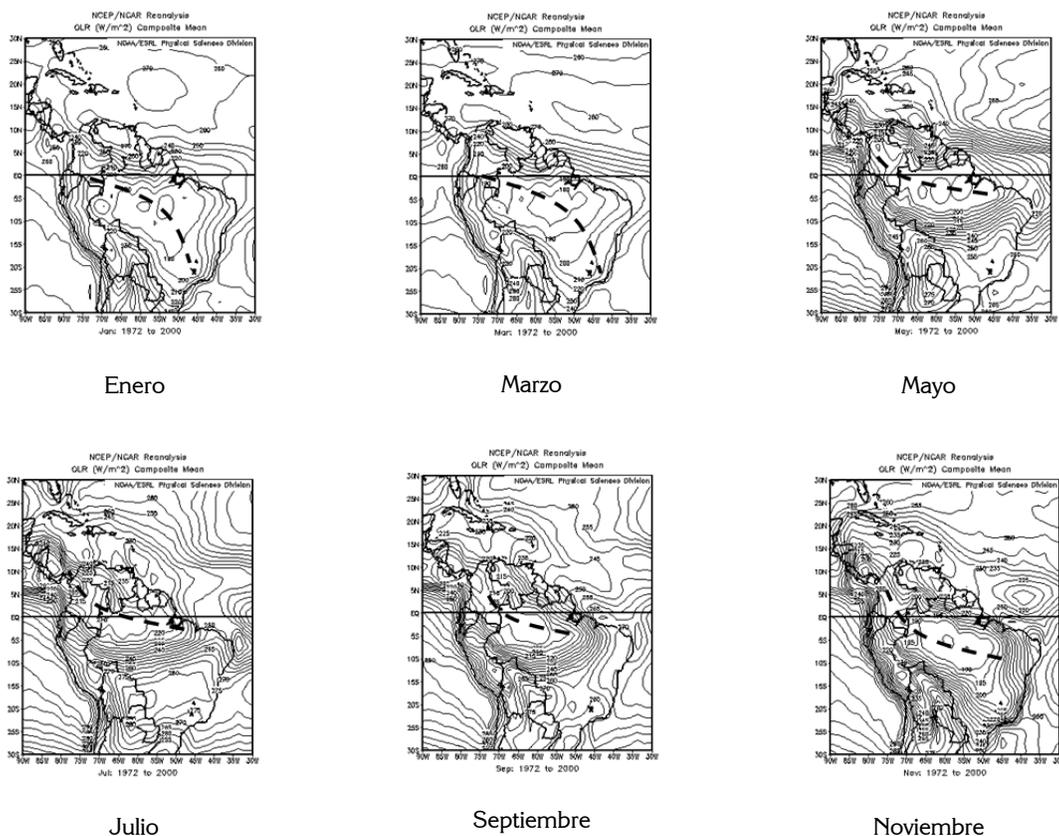
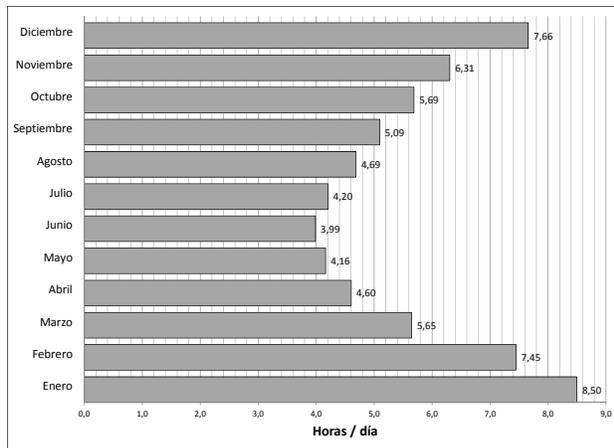
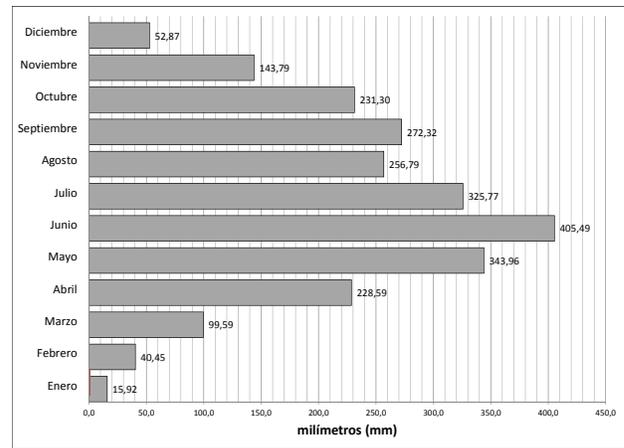


Figura 2. Paso de la zona de convergencia intertropical, caracterizado como función de la radiación de onda larga saliente (Kalnay et al., 1986).



Brillo solar



Precipitación

Figura 3. Efecto de la zona de convergencia intertropical sobre el brillo solar y la precipitación en la estación Carimagua.

meses de enero, febrero y marzo (Figura 4), por lo que en este período se presenta una gran cantidad de incendios naturales, y determinan que los departamentos del Meta y Vichada, donde se ubica la altillanura plana, sean los que tienen el más alto riesgo de sufrir estos eventos en Colombia (Armenteras et al., 2009). Según el IDEAM (2005), el comportamiento del número de días con lluvia es similar al del acumulado de lluvias, con un período de mayores frecuencias que se extiende de mayo a octubre, en el cual llueve alrededor de 20 días/mes, y un período con menor número de días lluviosos muy marcado, que va de diciembre a marzo, en el cual llueve en promedio de 1 a 4 días.

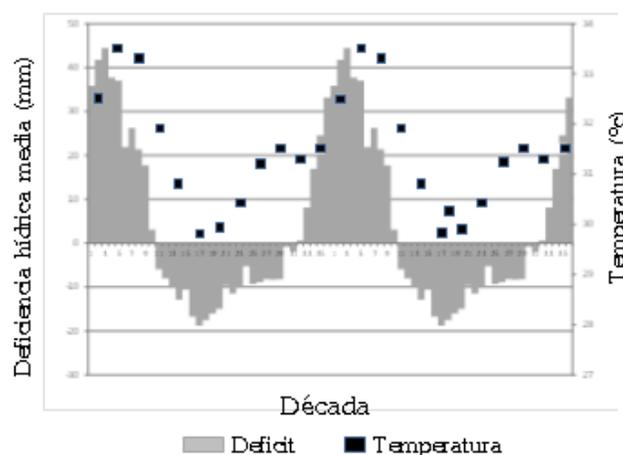


Figura 4. Déficit (+) y exceso (-) hídrico a nivel del suelo, como resultado al comparar las entradas de agua (lluvia) y las demandas atmosféricas (evapotranspiración) en una pastura mejorada.

Variabilidad interanual

La lluvia media anual en la altillanura plana colombiana es de 2600 mm. No obstante, en el centro de la misma, es decir, entre los 69 y 71 grados de longitud oeste, así como entre los 4.5 y 5.5 grados de latitud norte, se presentan los mayores acumulados de lluvia (entre 2800 y 3000 mm), mientras que en la periferia de esta zona se encuentran sitios un poco más secos, en los que se registran lluvias medias anuales entre 2200 y 2400 mm (Figura 5). El brillo solar promedio de la zona es de 2050 h/año, pero se encuentran zonas en el sector nororiental, hacia Puerto Carreño y Cumaribo (Vichada), donde la insolación anual es superior a 2200 h. Hacia el occidente, más cerca del piedemonte, y en general donde se presenta mayor cantidad de lluvias, el brillo solar es inferior a 2000 h/año (Figura 6), lo cual concuerda con lo reportado por Bernal (1986).

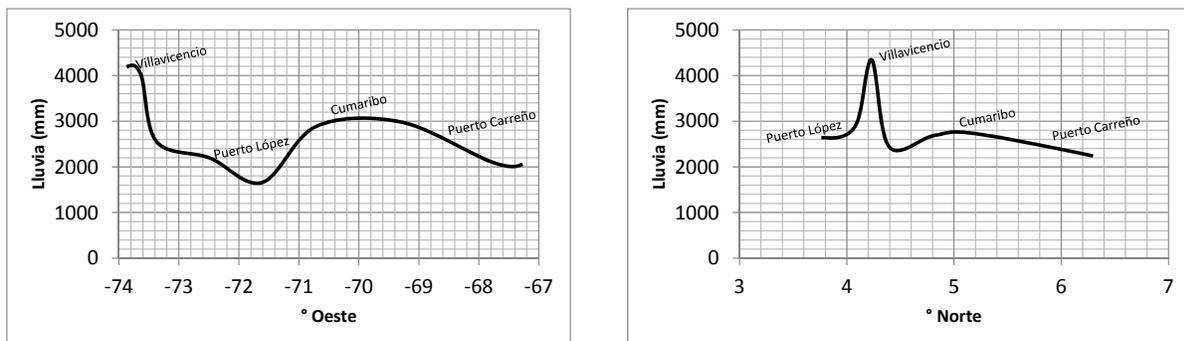


Figura 5. Perfiles longitudinales y latitudinales de lluvia media anual según los registros medios obtenidos en las estaciones de la Orinoquia colombiana. Las lluvias más altas de la región se presentan sobre el piedemonte (más de 4000 mm anuales).

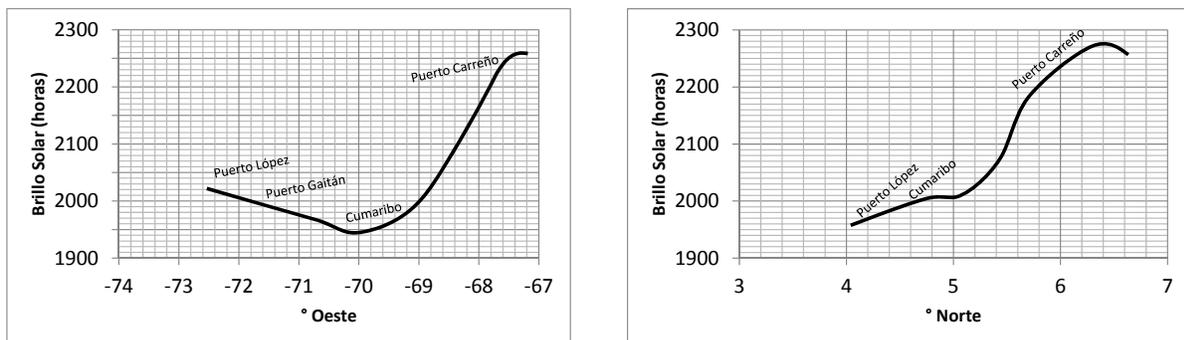


Figura 6. Perfiles longitudinales y latitudinales de brillo solar medio anual, según los registros medios obtenidos en las estaciones de la Orinoquia colombiana.

Las temperaturas máximas y mínimas medias varían poco de un sitio a otro. La temperatura máxima media anual promedio de la región es 32.1 °C y la temperatura mínima media anual es 22.5 °C, pero a diferencia de lo que ocurre en la región andina colombiana, donde los cambios de altitud determinan los cambios de temperatura (IDEAM, 2005), en esta región el principal modulador de las diferencias espaciales en temperatura es la latitud (Figura 7).

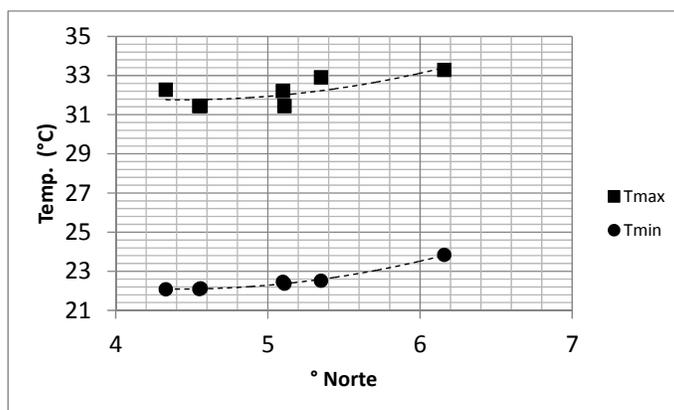


Figura 7. Relación entre las temperaturas medias anuales y la latitud en la altillanura plana colombiana.

Las localidades ubicadas al norte de la altillanura plana tienen mayores temperaturas que las ubicadas al sur. Esto se debe a que a principios de año, cuando la ZCIT inicia su migración al norte, como consecuencia del fortalecimiento de los alisios del sureste, ésta tarda un poco más de tiempo en alcanzar dichas localidades, razón por la cual tienen un primer trimestre más caluroso que las estaciones que se ubican al sur; de hecho, Montoya et al. (2001) reportan una intensificación de los vientos del noreste durante esta época del año, que incrementan la condición seca propia de esta estación. Situación similar se presenta en los últimos meses del año, cuando los alisios del noreste se intensifican y la banda nubosa empieza a desplazarse hacia la Amazonia (Figura 8). Este efecto (latitudinal) tiene una mayor influencia sobre la temperatura que la altitud, como se observa en la Figura 9, y básicamente se traduce en que las estaciones que se ubican más al norte presentan las temperaturas máximas medias en marzo, mientras que las que están hacia el sur las alcanzan en febrero (Figura 10).

A diferencia de lo que ocurre en la mayor parte del país, donde la presencia de El Niño y La Niña determinan, en gran medida, la condición de años secos y húmedos en la altillanura plana, el efecto ejercido por los períodos de enfriamiento y calentamiento de las aguas superficiales del Océano Pacífico tropical no determinan cambios drásticos en los acumulados de lluvia anual (Figura 11); lo que se observa es que los años más lluviosos se alternan con años secos, siguiendo un patrón cuasi bianual (Figura 12).

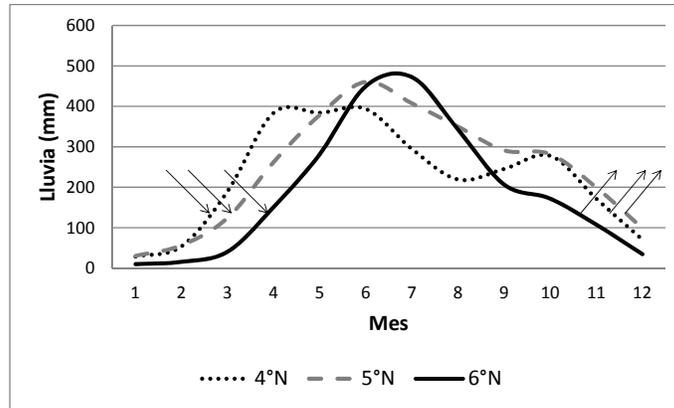


Figura 8. Esquema del comportamiento intraanual de la zona de convergencia intertropical como función de las lluvias (banda nubosa).

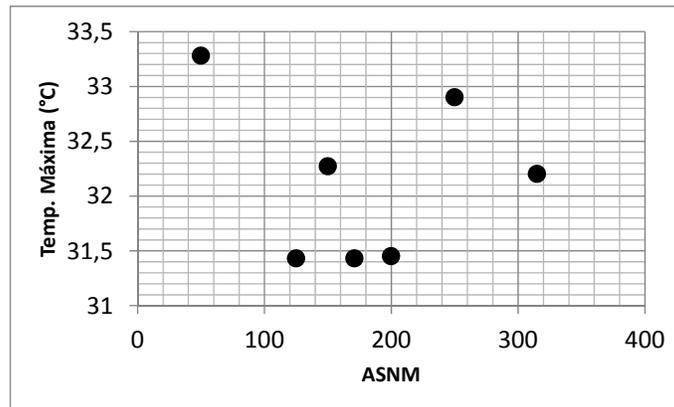


Figura 9. Relación entre la altura sobre el nivel del mar (ASN) y la temperatura máxima media anual. Se observa cómo las estaciones más bajas no tienen necesariamente las más altas temperaturas máximas, como sucede en la región andina.

Al igual que la precipitación, la temperatura máxima media anual del ambiente no se afecta significativamente por los cambios de la temperatura superficial de las aguas del Océano Pacífico tropical (Figura 13). Solamente las temperaturas máximas medias de los meses correspondientes a la temporada seca (diciembre-febrero) se ven afectadas por El Niño y La Niña, como lo han reportado para otras localidades del país Peña et al. (2001) y Ramírez y Jaramillo (2009). Durante esta época, bajo condición El Niño, se incrementa significativamente la temperatura del aire, mientras que durante La Niña disminuye (Cuadro 1).

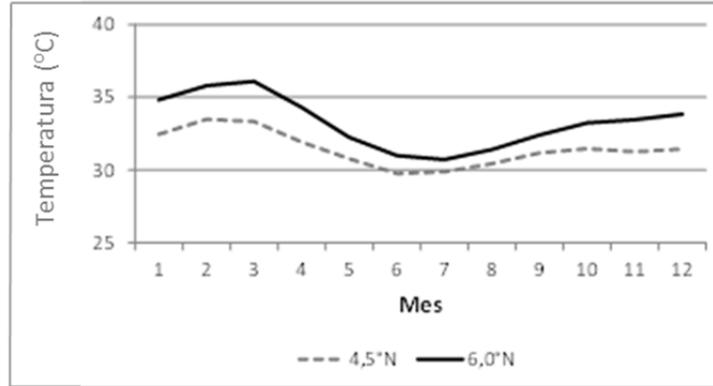


Figura 10. Comportamiento intraanual de la temperatura máxima en dos estaciones de la altillanura plana ubicadas en dos latitudes diferentes.

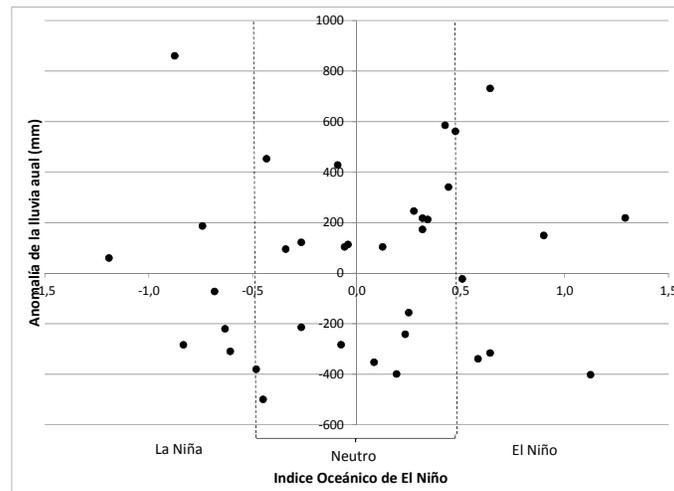


Figura 11. Anomalías de precipitación anual en función de la condición predominante a través del año (El Niño, La Niña, o Neutro). La probabilidad de tener anomalías positivas (lluvias superiores al promedio) o anomalías negativas (lluvias inferiores al promedio) es igual bajo cualquier escenario de variabilidad climática.

A diferencia de lo que ocurre con la temperatura máxima, la mínima media anual se ve afectada por El Niño y la Niña, especialmente durante el primer semestre del año; en tal sentido, las temperaturas nocturnas son más altas bajo condición El Niño y más bajas bajo condición La Niña (Figura 14 y Cuadro 2).

El brillo solar no se ve afectado por los escenarios ENOS (El Niño y La Niña) y sus valores medios anuales son más dependientes de la ZCIT que de cualquier otro factor (Cuadro 3).

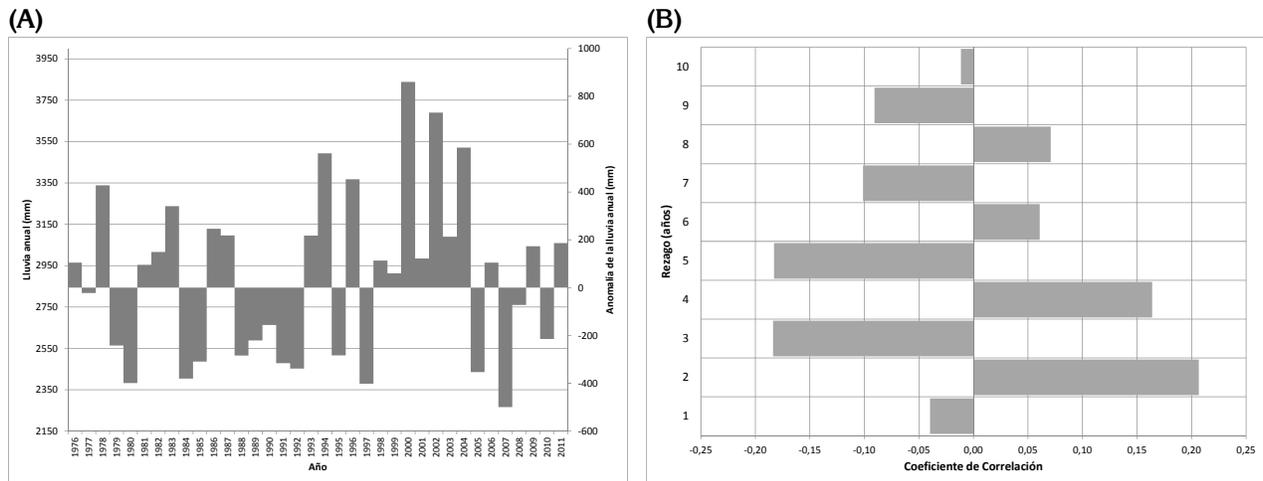


Figura 12. (A) Serie histórica anual de la estación Las Gaviotas (Cumaribo, Vichada), a 4° 33' 14.2" N y 70° 55' 48.4" O. Se observa, con pocas excepciones, cómo después de un año lluvioso se presenta un año seco. (B) Función de autocorrelación de la serie de precipitación anual. Se observa cómo los valores anuales de lluvia del año actual se relacionan negativamente con los del año siguiente y positivamente con los de dos períodos siguientes (oscilación cuasi bianual).

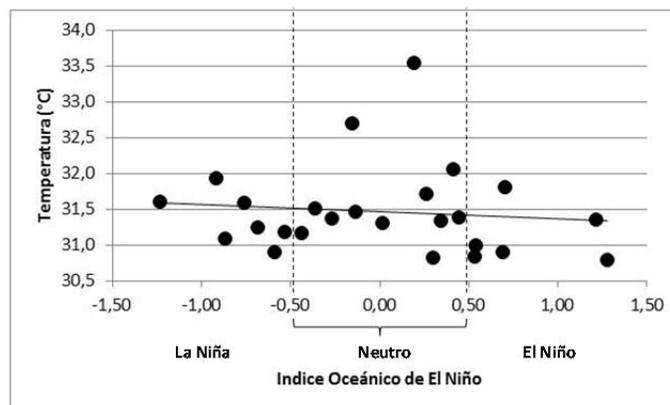


Figura 13. Temperatura máxima media anual en función de la condición predominante a través del año (El Niño, La Niña, o Neutro). La probabilidad de tener altas o bajas temperaturas a través del año es igual bajo cualquier escenario de variabilidad climática.

Cuadro 1. Coeficiente de correlación obtenido al comparar el índice oceánico de El Niño (ONI, por sus siglas en inglés) con la temperatura máxima media mensual del aire.

Estación	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.
Carimagua	<u>0.57</u>	<u>0.61</u>	0.12	<u>-0.31</u>	0.05	-0.03	-0.19	0.01	-0.08	-0.09	<u>0.24</u>	0.17
Las Gaviotas	<u>0.56</u>	<u>0.50</u>	<u>0.30</u>	-0.14	0.07	0.23	-0.12	0.02	0.15	0.14	<u>0.24</u>	<u>0.38</u>

Valores positivos del índice están asociados a El Niño, mientras que los valores negativos se asocian con La Niña, por lo que los coeficientes de correlación positivos se asocian a calentamiento durante El Niño y enfriamiento durante La Niña. Subrayadas las correlaciones significativas al 95% de confianza.

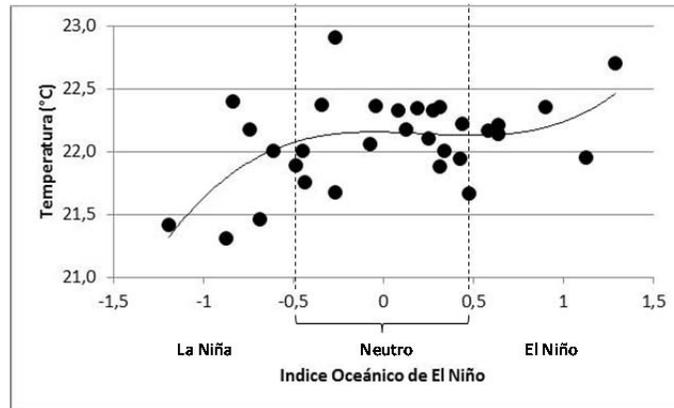


Figura 14. Temperatura mínima media anual en función de la condición predominante a través del año (El Niño, La Niña, o Neutro). La probabilidad de tener altas temperaturas es mayor bajo El Niño y la de tener temperaturas menores es superior durante La Niña. Se observa una mayor influencia de La Niña que de El Niño.

Cuadro 2. Coeficiente de correlación obtenido al comparar el índice oceánico de El Niño (ONI, por sus siglas en inglés) con la temperatura mínima media mensual del aire.

Estación	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.
Carimagua	<u>0.40</u>	<u>0.45</u>	<u>0.58</u>	<u>0.58</u>	<u>0.38</u>	<u>0.33</u>	0.11	-0.03	0.06	0.15	0.20	0.23
Las Gaviotas	<u>0.67</u>	<u>0.58</u>	<u>0.75</u>	<u>0.66</u>	<u>0.54</u>	<u>0.34</u>	<u>0.39</u>	-0.01	-0.01	<u>-0.55</u>	-0.23	0.29

Valores positivos del índice están asociados a El Niño, mientras que los valores negativos se asocian con La Niña, por lo que los coeficientes de correlación positivos se asocian a calentamiento durante El Niño y enfriamiento durante La Niña. Subrayadas las correlaciones significativas al 99% de confianza.

Cuadro 3. Coeficiente de correlación obtenido al comparar el índice oceánico de El Niño (ONI, por sus siglas en inglés) con el brillo solar medio.

Estación	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.
Carimagua	-0.01	0.03	-0.08	<u>-0.37</u>	-0.10	0.11	-0.24	0.14	0.09	-0.21	-0.02	0
Las Gaviotas	0.01	-0.02	<u>-0.32</u>	<u>-0.36</u>	-0.24	0.12	-0.18	0.07	0.17	-0.04	-0.12	0.17

Se observa que no hay una relación entre este índice y el elemento analizado. Subrayadas las correlaciones significativas al 95% de confianza.

Análisis de tendencias

En general, los valores de las series meteorológicas anuales no presentan tendencias significativas, es decir, no hay cambios en los valores de las mismas como consecuencia del paso del tiempo.

No obstante, los análisis estacionales multianuales de las series de temperatura mínima media de la estación Las Gaviotas muestran que la temporada comprendida entre diciembre y febrero tiene, cada año, temperaturas mínimas más bajas. Según el análisis de Mann-Kendall (Önöz y Bayazit, 2003), esta tendencia es significativa (95% de confianza) y se encuentra que la tasa de enfriamiento ocurrida en esta temporada durante los últimos 30 años es de $-0.20\text{ }^{\circ}\text{C}$ por cada década (10 años), de tal forma que la temperatura mínima media de esta temporada ha sufrido cambios, ya que pasó de $22\text{ }^{\circ}\text{C}$ (1981–1990) a $21.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ (2001–2010) (Figura 15); no obstante, esto puede estar asociado a la prevalencia de meses La Niña durante los últimos años.

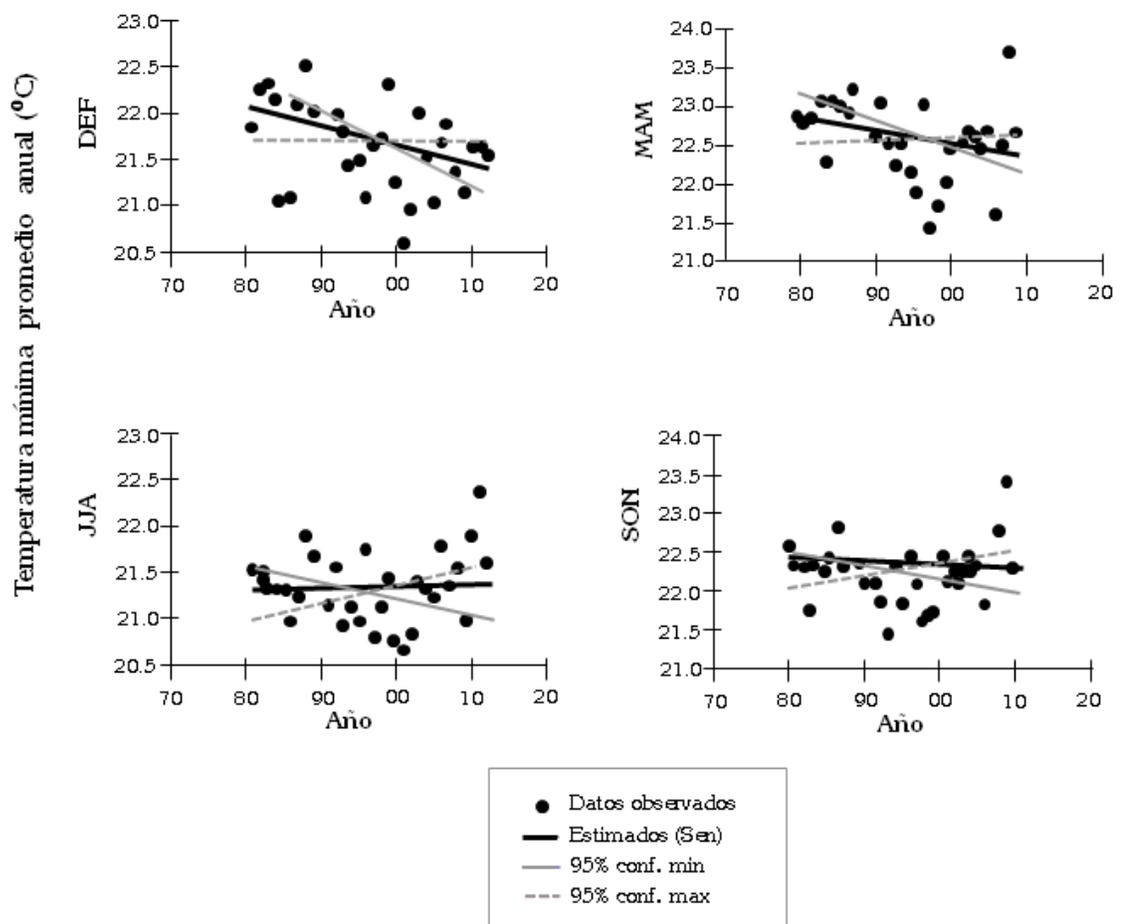


Figura 15. Análisis de la tendencia en los valores de temperatura mínima media anual de la estación Las Gaviotas. Se observa tendencia monotónica negativa significativa (95% de confianza) durante los meses que van de diciembre a febrero (DEF).

De otro lado, la temporada comprendida entre junio y agosto ha venido presentando mayores valores de temperatura máxima cada año, mientras que en las otras temporadas no se presenta ninguna tendencia. Para esa época en particular, el incremento de la temperatura máxima es de $0.36\text{ }^{\circ}\text{C}$ por cada década (según el análisis de Sen), y según la prueba de Mann Kendall esta tendencia es significativa con un 95% de confianza (Figura 16), de tal forma que la temperatura máxima media de esta época del año ha sufrido cambios significativos; pasó de $29.83\text{ }^{\circ}\text{C}$ en la década comprendida entre 1981 y 1990 a $30.81\text{ }^{\circ}\text{C}$ en la década comprendida entre 2001 y 2010.

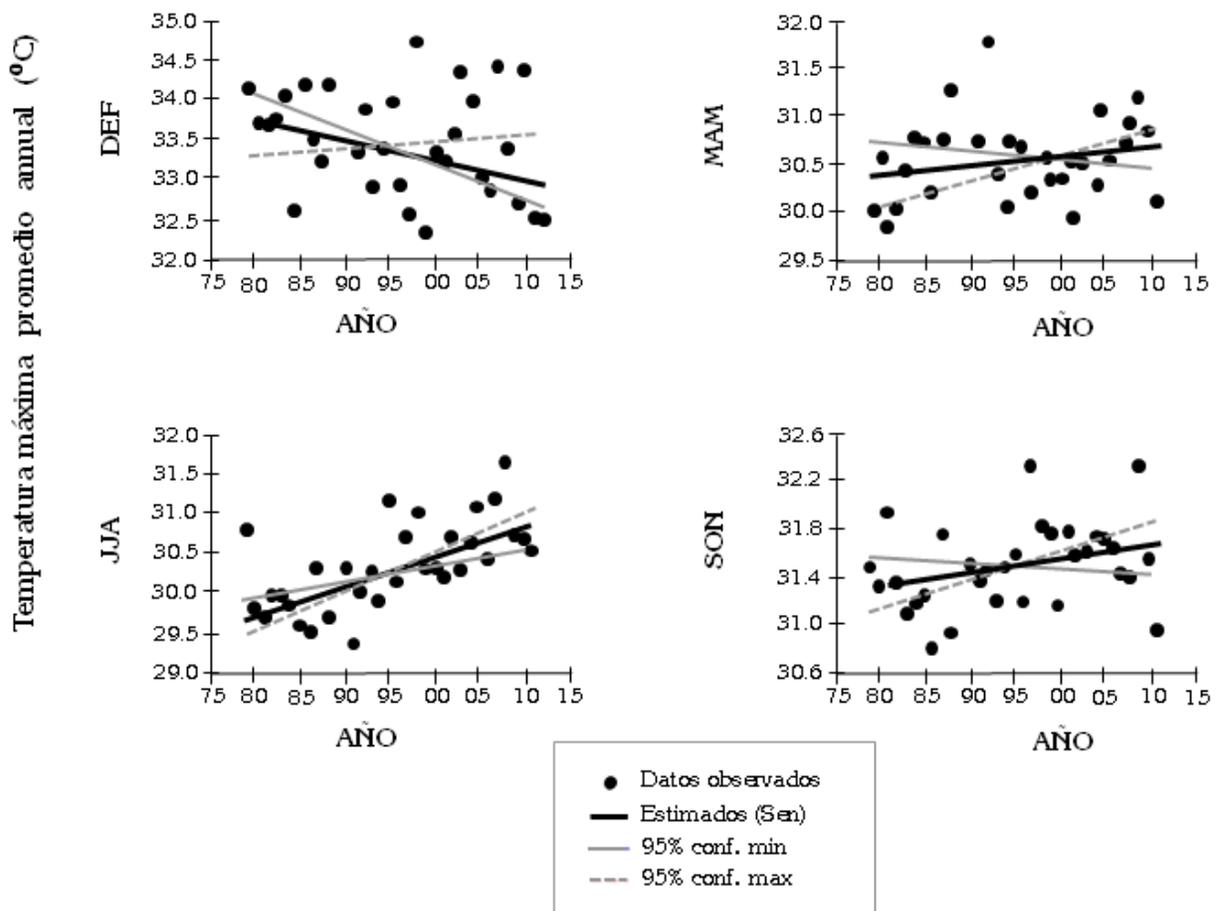


Figura 16. Análisis de la tendencia en los valores de temperatura máxima media anual de la estación Las Gaviotas. Se observa tendencia monótonica significativa y positiva (95% de confianza) durante los meses que van de junio a agosto (JJA).

La lluvia no tiene tendencias significativas que hagan pensar que algunas épocas del año se están volviendo más o menos lluviosas (Figura 17). El brillo solar no presenta tendencia monótonica significativa en ninguna época del año (Figura 18).

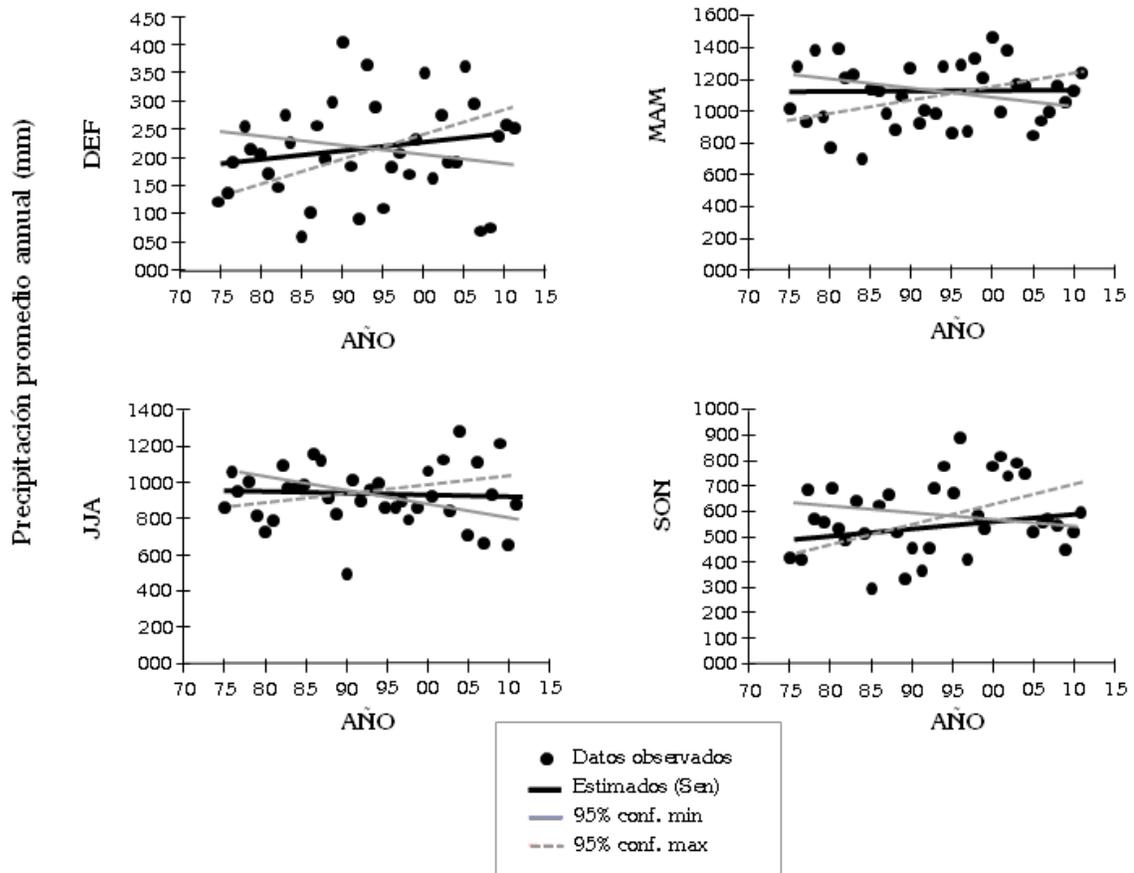


Figura 17. Análisis de la tendencia en los valores de precipitación anual de la estación Las Gaviotas. No se observa tendencia monotónica significativa en ninguna época del año.

Conclusiones

Los análisis estacionales multianuales de las series de temperatura mínima media en los últimos 30 años en la zona, muestran que el período comprendido entre diciembre y febrero presenta temperaturas mínimas más bajas de $-0.20\text{ }^{\circ}\text{C}$ por cada década. Mientras para la temporada comprendida entre junio y agosto ha venido presentando mayores valores de temperatura máxima promedio con incrementos equivalentes a $0.36\text{ }^{\circ}\text{C}$ por cada década, según el análisis de Sen y la prueba de Mann Kendall, la precipitación no presenta tendencias significativas que indiquen que algunas épocas del año se están volviendo más o menos lluviosas.

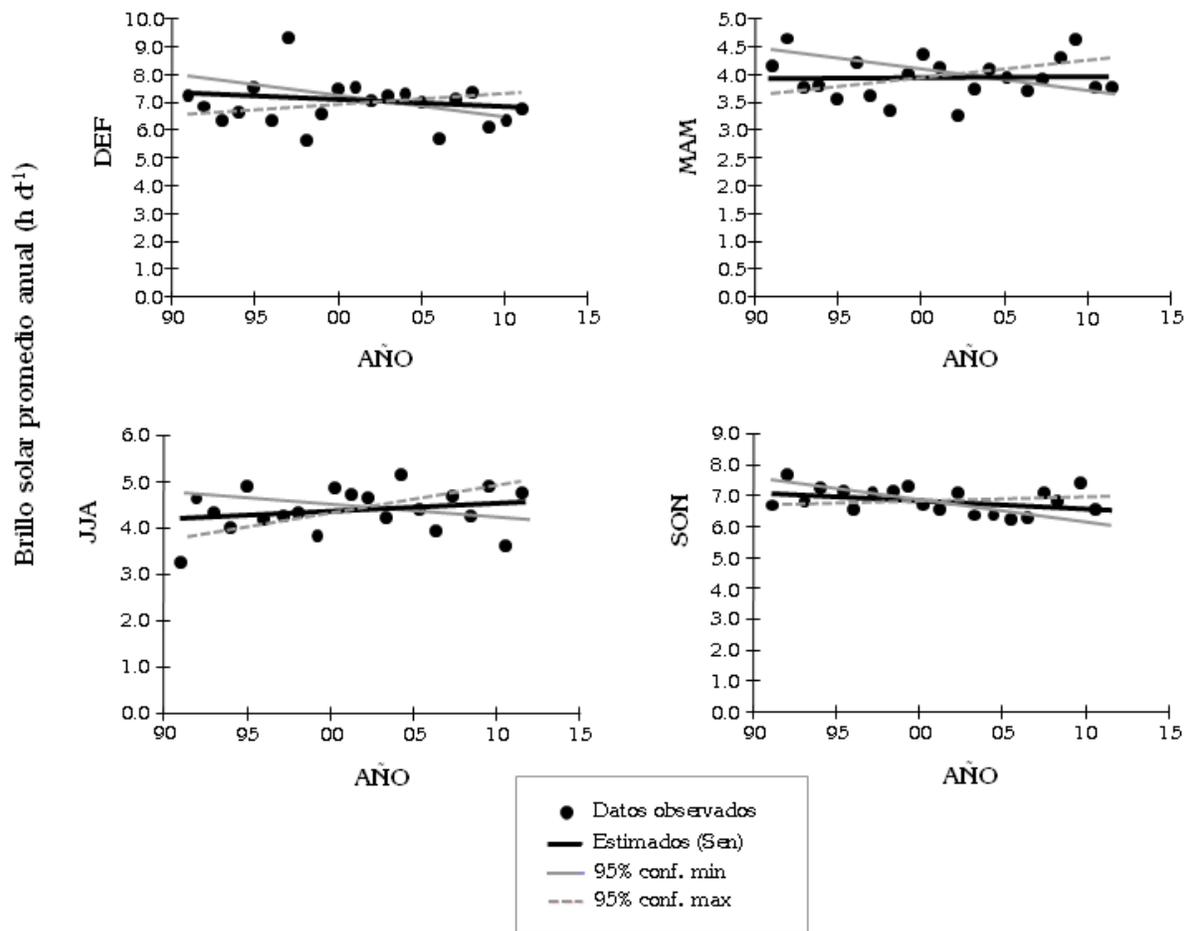


Figura 18. Análisis de la tendencia en los valores de brillo solar anual de la estación Las Gaviotas. No se observa tendencia monotónica significativa en ninguna época del año.

Referencias

- Armenteras D; González F; Franco C. 2009. Distribución geográfica y temporal de incendios en Colombia utilizando datos de anomalías térmicas. *Caldasia* 31(2):303–318.
- Bernal G. 1986. Estudio del régimen de brillo solar en Colombia. *Atmósfera* 9:53–66.
- Eslava J; López V; Olaya G. 1986a. Los climas de Colombia (Sistema de W. Koeppen). *Atmósfera* 5:35–81.
- Eslava J; López V; Olaya G. 1986b. Los climas de Colombia (Sistema de Caldas-Lang). *Atmósfera* 7:41–78.
- Eslava J; López V; Olaya G. 1986c. Los climas de Colombia (Sistema de E. de Martonne). *Atmósfera* 8:47–80.

- IDEAM (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales). 2005. Atlas climatológico de Colombia. 232 p.
- Kalnay E; Kanamitsu M; Kistler R; Collins W; Deaven D; Gandin L; Iredell M; Saha S; White G; Woollen J; Zhu Y; Chelliah M; Ebisuzaki W; Higgins W; Janowiak J; Mo KC; Ropelewski C; Wang J; Leetmaa A; Reynolds R; Jenne R; Joseph D. 1996. The NCEP/NCAR 40-Year Reanalysis Project. *Bulletin of the American Meteorological Society* 77(3):437–471.
- León A, GE; Zea M, JA; Eslava R, JA. 2000. Circulación general del trópico y la zona de confluencia intertropical en Colombia. *Meteorología Colombiana* 1:31–38.
- Montoya G; Pelkowski J; Eslava J. 2001. Sobre los alisios del nordeste y la existencia de una corriente en el piedemonte oriental andino. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales* 25(96):363–370.
- Önöz B; Bayazit M. 2003. The power of statistical tests for trend detection. *Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences* 27:247–251.
- Peña Q, AJ; Cortés B, E; Montealegre L, F. 2001. Incidencia de los fenómenos “El Niño” y “La Niña” sobre las condiciones climáticas en el valle del río Cauca. Parte II: Análisis de correlaciones. *Meteorología Colombiana* 3:119–128.
- Ramírez V; Jaramillo A. 2009. Relación entre el índice oceánico de El Niño y la lluvia en la región andina central de Colombia. *Revista Cenicafé* 60(2):161–172.
- Smithsonian Institution. 1893. Smithsonian meteorological tables (based on Guyot’s meteorological and physical tables). p 161–177.

CAPÍTULO 3

Propiedades Físicas de los Suelos de los Llanos Orientales y sus Requerimientos de Labranza¹

E. Amézquita²

Resumen

Se definen algunos aspectos relacionados con las prácticas de labranza de suelos, los cuales a pesar de ser permanentemente utilizados por profesionales e investigadores en labranza, carecen de definiciones precisas y se prestan a mucha confusión. Asimismo se plantea la importancia de la aplicación de aparatos de labranza al suelo y sobre su importancia en el control de los factores edafológicos de crecimiento de las plantas, los cuales se consideran esenciales para el buen crecimiento y desarrollo de las raíces y para la obtención de altos rendimientos. A partir de datos experimentales y de la evaluación de propiedades y procesos físicos de algunos suelos de la altillanura colombiana, se discute sobre los sistemas de labranza más acordes con la situación actual de los suelos y sobre los conceptos de creación de una capa arable, la cual es indispensable para el desarrollo y ejecución de sistemas conservacionistas y de no labranza, como una primera etapa para conseguir suelos sostenibles y así poder hacer una agricultura sostenible sobre ellos. Se discuten también algunos de los aspectos relacionados con la selección de tratamientos de labranza, cuando se planifican ensayos de preparación de suelos, de tal manera que el investigador esté siempre consciente de qué problema o problemas pretende solucionar al escoger los tratamientos y de qué respuesta, en términos de mejoramiento de suelos y de cultivos, espera obtener. Por último se plantea la necesidad que se tiene en la agricultura tropical bajo labranza, de comprender que la labranza en suelos con estructura débil constituye la práctica agrícola más importante, ya que mediante ella se construye o se destruye el recurso suelo.

Palabras claves: labranza, propiedades físicas, requerimientos labranza, altillanura, sabana, labranza vertical, capa arable, perfil cultural, suelos tropicales, cambios por labranza

-
1. Publicado en Memorias del Taller sobre "Encuentro Nacional de Labranza de Conservación", realizado en Villavicencio, Meta, abril 28–30 de 1998; editadas por Gabriel Romero C., Diego Aristizábal Q. y César A. Jaramillo S. p 145–174.
 2. Física de suelos, Consultor Internacional. eamezquitac@gmail.com

Introducción

Aunque la labranza es una práctica trascendental para asegurar el mejoramiento de los suelos y garantizar la sostenibilidad de la agricultura, ha tenido poca importancia, si se la compara con la que se le ha dado a los problemas de acidez y de fertilidad en los suelos tropicales. La fragilidad de la estructura de los suelos tropicales y su susceptibilidad a sellamiento, compactación, adensamiento y erosión, cuando se someten a sistemas de labranza intensivos, los hace muy susceptibles a degradación, con los consiguientes efectos negativos en la sostenibilidad agrícola y ganadera. A partir de los efectos negativos que los sistemas de labranza que se han utilizado han producido en muchos suelos del país, se ha despertado en Colombia un vivo interés por conocer el comportamiento de suelos y de cultivos cuando se aplican diferentes sistemas de labranza.

Con el ánimo de contribuir a la aclaración de ciertos conceptos utilizados en la investigación y en la práctica de la labranza y de discutir sobre las propiedades físicas que tienen que ver con las decisiones de preparación de suelos en la altillanura colombiana, se ha preparado este capítulo, el cual inicia con dos preguntas fundamentales:

- *¿Para qué es la labranza?* La labranza, en su concepción de comportamiento físico del suelo, debe ser utilizada para corregir cualquier factor físico que sea limitante para el desarrollo normal de las raíces de los cultivos que se piensan establecer. El haber conceptualizado la labranza como un medio para controlar malezas o para obtener una mejor acción de los herbicidas, ha conducido al deterioro estructural superficial de muchos suelos a nivel mundial y, especialmente, a nivel de la faja tropical. En Colombia es común ver cómo los suelos bajo agricultura intensiva han ido perdiendo su estructura superficial y como resultado se han sellado y encostrado.

La labranza debe ser siempre correctiva y creativa. *Correctiva*, en el sentido de que debe corregir cualquier factor físico limitante que presente el suelo para el desenvolvimiento normal de las raíces de las plantas. *Creativa*, en el sentido de que permanentemente debe conducir al desarrollo de una capa arable que no presente limitantes físicas, químicas, ni biológicas para el crecimiento de las raíces, de tal manera que se vaya edificando la sostenibilidad de los suelos y de la agricultura.

- *¿Qué es labranza?* Labranza o preparación de suelos es la manipulación mecánica de éstos, con el fin de alterar su estructura y disminuir su resistencia a la penetración de las raíces para convertirlos en un medio con condiciones óptimas para la germinación de las semillas y el desarrollo productivo de los cultivos (Figueroa y Morales, 1992). Esta definición, aunque objetiva, generaliza la función de la labranza al no especificar que ésta debe corregir problemas específicos que deben haber sido identificados y diagnosticados previamente. Hillel et al. (1969) definen la labranza como la manipulación mecánica del suelo, que tiende a mejorar las condiciones del

suelo que afectan la producción de cultivos. Afirma que los tres objetivos que se buscan con la labranza son: (a) incorporación de materia orgánica dentro del suelo, (b) control de malezas, y (c) mejoramiento de la estructura. Una función auxiliar, que actualmente no está bien entendida, es la conservación de la humedad, la cual involucra los procesos de infiltración, escorrentía y evaporación (Hillel et al., 1969) del agua del suelo. Estos conceptos son compartidos por Gill y Vanden Berg (1967) en su tratado sobre labranza, quienes además profundizan en lo relacionado con fracción, respuesta del suelo a diferentes tipos de implementos y sobre la conceptualización de los principios que rigen la labranza.

Definiciones y tipos de labranza comunes en Colombia

- *Sistema de labranza:* Serie secuencial de actividades que deben conducir a obtener, a través del tiempo, un suelo ideal para el desarrollo de las raíces de las plantas que permita que ellas expresen su potencial genético sin restricciones. Se realiza con el fin de corregir cualquier factor limitante que posea el suelo y controlar cualquier proceso degradativo.
- *Labranza primaria:* Es la que se hace con arado de discos o de vertedera, con cinceles, con subsolador o con rastras pesadas para descompactar capas endurecidas o adensadas e incorporar materia orgánica, con el fin de facilitar el desarrollo de las raíces de los cultivos. Es más agresiva y profunda (0–350 mm) que la secundaria y produce mayor rugosidad en el terreno.
- *Labranza secundaria:* Es la que remueve el suelo superficialmente (a poca profundidad), proporciona mayor fraccionamiento de terrones superficiales y tiende a nivelar el terreno. Se hace con rastra de discos. Su profundidad de acción varía entre 0–150 mm.
- *Cama de siembra:* Es la capa más superficial de un suelo laborado, la cual se consigue con el uso del rastrillo pulidor después de que el suelo ha sido arado y rastrillado. Es la capa de suelo sobre la cual se deposita la semilla para asegurar su germinación.
- *Labranza convencional:* Se refiere a una combinación de labranza primaria hecha con uno o dos pases de arado de discos y de labranza secundaria hecha con dos o tres pases de rastra, más un pase de pulidor. Es la labranza que usualmente se realiza en las zonas frías del país.
- *Labranza limpia:* Es el proceso de arar y rastrillar un suelo, incorporando todos los residuos y previniendo el crecimiento de todo tipo de vegetación, excepto el del

cultivo particular que se desea obtener durante el ciclo de crecimiento (SSSA, 1987). Prácticamente equivale a la labranza convencional.

- *Labranza reducida*: Sistema en el cual las operaciones de labranza primaria son modificadas conjuntamente con procedimientos especiales de siembra, de tal manera que se reduzcan o eliminen las operaciones de labranza secundaria.
- *Labranza apropiada*: Es la que actualmente requiere un suelo para el control de los factores que puedan afectar negativamente a los cultivos.
- *Labranza vertical*: Es la que se hace con cinceles y subsolador para "aflojar" capas compactadas y/o endurecidas, con el fin de promover mayor infiltración y crecimiento de raíces. El suelo entra en contacto con el implemento solo en las líneas donde van acopladas las estructuras verticales (patas), las cuales producen la ruptura angular (45°) del suelo hacia la superficie.
- *Labranza horizontal*: Es la que se realiza fundamentalmente con implementos que poseen discos (arados, rastras, rastrillos, "big rome", etc.), los cuales disturbán la totalidad del suelo a la profundidad del trabajo.
- *Labranza mínima*: Es la mínima manipulación que se hace al suelo para la siembra de la semilla de un cultivo. Exige que el suelo presente una buena condición física, química y biológica para el crecimiento de las raíces.
- *Labranza cero*: Es el procedimiento mediante el cual la siembra se hace directa y esencialmente en suelo no preparado, es decir, que no se disturba el suelo antes de la siembra.
- *Labranza de conservación*: Cualquier sistema de labranza y de siembra en el cual por lo menos un 30% de la superficie del suelo queda cubierta por residuos de plantas después de la siembra, con el fin de controlar erosión (CTIC, 1993). En este sistema se conserva la rugosidad de la superficie (Mannering y Fenster, 1983; Allmaras et al., 1985).

Relaciones entre la labranza y los factores edafológicos de crecimiento de las plantas

Se consideran como los factores edafológicos de crecimiento de las plantas a nivel de zona de crecimiento de raíces a los siguientes:

- Presencia y disponibilidad de los elementos nutritivos esenciales
- Succión del agua del suelo

- Aireación en la zona radical
- Penetración de raíces
- Temperatura

Se denominan factores de crecimiento porque su presencia es absolutamente necesaria para el crecimiento de las plantas; además deben estar presentes en cantidades adecuadas. El criterio de esencialidad se refiere a que en ausencia de cualquiera de ellos, las plantas no pueden crecer. Por ejemplo, sin agua las plantas no pueden crecer, sin aire no pueden respirar y, por lo tanto, no pueden crecer y producir rentablemente; si el suelo no permite que las raíces se desarrollen por oponer alta resistencia a su penetración, el crecimiento de los cultivos será muy restringido; si la temperatura del suelo es muy baja o excesivamente alta, las raíces no pueden desarrollarse. Además, a temperaturas extremas las reacciones químicas del suelo se ven notablemente afectadas; también se afecta negativamente la absorción de agua y de nutrientes por los cultivos. Por último, una suplenencia inadecuada e inoportuna de elementos nutritivos también afecta negativamente a los cultivos (Amézquita, 1991).

El criterio de suficiencia se refiere a que los cinco factores arriba mencionados deben presentarse dentro de determinados rangos óptimos, para que las plantas puedan expresar todo su potencial genético. Por ejemplo, existen límites críticos para la interpretación de cada uno de los diferentes elementos nutritivos; para el crecimiento óptimo de los cultivos, el porcentaje de humedad del suelo debe estar cercano a capacidad de campo; el porcentaje de espacio aéreo a capacidad de campo debe estar alrededor del 10% para que no haya restricciones en la aireación del suelo y para evitar que esto afecte negativamente a los cultivos. Si los valores de penetrabilidad del suelo medido con penetrómetro exceden 0.1 MPa (1 bar) a capacidad de campo, puede haber grandes restricciones en el crecimiento de las raíces (Amézquita, 1994). Los cinco factores de crecimiento de las plantas son afectados directa y positivamente, o negativamente por la labranza. La manipulación del suelo, como se mencionaba antes, produce cambios en el acomodamiento actual (estructura) del suelo. Al producir aflojamiento de éste como consecuencia de las fuerzas aplicadas a través de los implementos de labranza, se aumenta el volumen que ocupaba el suelo y suceden cambios profundos en el acomodamiento y empaquetamiento del suelo, lo cual causa variaciones en sus propiedades volumétricas.

Una de las formas de estudiar la estructura del suelo, desde el punto de vista de producción agrícola, es el de considerarlo como un medio poroso compuesto por poros de diferentes tamaños: macro, meso y microporos, los cuales por su condición de tamaño confieren al suelo diferentes cualidades y comportamientos en relación con el crecimiento de las plantas (Greenland, 1977). Por los macroporos se infiltra y mueve el agua que procedente de las lluvias llega al suelo. Por ellos también circula el aire que lleva oxígeno a las raíces y dentro de ellos crecen las raíces y los pelos absorbentes de las plantas. Su diámetro equivalente tiene un límite inferior de 50 μm . En los mesoporos (5.0–0.2 μm) se almacena el agua aprovechable, que no es otra cosa que la solución nutritiva del suelo, la cual es absorbida por

las raíces de las plantas para cumplir sus funciones de transpiración y de nutrición. En los microporos ($<0.2 \mu\text{m}$) se encuentran en forma reducida los elementos Fe y Mn, los cuales solo en esta forma pueden ser absorbidos por las raíces. Por los macro, meso y macroporos se realizan, respectivamente, los procesos de interceptación, flujo de masa y difusión, por los cuales llegan los nutrientes a ponerse en contacto con las raíces (Orozco, 1991; Amézquita, 1994).

La labranza, al causar variaciones en la estructura actual del suelo, ocasiona cambios en la distribución de tamaño de los poros; de esa manera afecta positiva o negativamente la distribución de tamaño de los poros y los procesos que ellos afectan en relación con el crecimiento de las plantas. Es por esto que el autor considera la labranza como la práctica agrícola más importante que se hace a los suelos, porque si ella se hace con conocimiento de qué problema o problemas se piensan solucionar, conduce a la sostenibilidad de los suelos y de la agricultura; en caso contrario conduce a la degradación.

Una labranza constructiva debe conducir a obtener una buena distribución y estabilidad del sistema poroso. Debe tender a conseguir entre un 10–15% de macroporos, entre 20–25% de mesoporos y entre 10–15% de microporos en los primeros 25 a 30 cm de profundidad, de tal manera que se asegure la continuidad del espacio poroso en profundidad. Por otro lado debe velar porque esa condición de buena distribución de poros que se ha creado sea estable en el tiempo, lo cual se consigue mediante la adición de materiales vegetales lignificados (tamos) fraccionados, los cuales al incorporarse al suelo en ciclos sucesivos de cultivo impiden que el suelo vuelva a la condición porosa que tenía antes de la aplicación del sistema de labranza.

Diagnóstico del suelo en el campo para identificar sistemas de labranza

Siempre debe hacerse el diagnóstico de las limitantes físicas de los suelos en el campo que se va a sembrar. El técnico o el agricultor nunca debe decidir sobre un sistema de labranza desde la oficina porque fracasará. El suelo y su problemática indicará qué sistema o sistemas de labranza requiere para solucionar la o las limitantes físicas que posee. Es un error pretender solucionar los problemas que posee un suelo sin haberlo evaluado y diagnosticado previamente. Solo el suelo indica su problemática, la cual siempre es específica del sitio y no se puede generalizar. Para el diagnóstico de campo se recomienda hacer cajuelas (40–40–40 cm) en varios sitios de campo. La selección de sitios para la elaboración de cajuelas puede hacerse al azar, en forma diagonal cruzada o en zig-zag en el lote problema. Se recomienda hacer un mínimo de 10–15 cajuelas en un lote o más si el muestreador no está satisfecho con la representatividad de los sitios que ha escogido para evaluar la problemática del terreno. Una vez elaboradas las cajuelas, se procede a la observación y toma de nota de las propiedades físicas que se presentan en cada una de ellas. Interesa conocer la profundidad de la capa superficial, los cambios de color, textura y estructura, la presencia de capas endurecidas, el

espesor de éstas, la continuidad del espacio poroso, la profundidad a la cual se presenta el mayor número de raíces, los cambios en contenido de humedad, etc. La evaluación de dureza o penetrabilidad de las capas se puede hacer con navaja, cuchillo o penetrómetro, para darse cuenta a qué profundidad se producen cambios. En las cajuelas y a las profundidades escogidas se hacen también los muestreos para los análisis físicos y químicos de laboratorio.

La evaluación de las cajuelas debe ser muy objetiva. En muchos casos dentro de un horizonte "A" genético se presentan capas con diferentes condiciones físicas, lo cual quiere decir que el solo color del suelo superficial, aunque es un indicativo de uniformidad genética, no lo es de uniformidad física. Se han desarrollado metodologías que ayudan a las evaluaciones (Laryea et al., 1997) y Lal (1993, 1994) discute sobre las propiedades cambiantes por el uso y la labranza de suelos tropicales.

Una vez realizada la evaluación física en el campo, se procede a comparar la forma como se manifiestan las diferentes condiciones físicas en las cajuelas. Si el comportamiento del suelo es uniforme a través del lote, se elegirá el sistema de labranza que solucione la o las limitantes que actualmente posea. Si se presentan diferencias en las limitantes observadas, éstas se mapean y se manifiesta que el lote no es uniforme y se decide sobre el tipo de labranza que debe hacerse en cada sub-lote.

Principales problemas de orden físico que restringen la producción agropecuaria en el trópico

Los principales problemas de orden físico asociados con labranza que restringen o causan disminución en los rendimientos de los cultivos en los suelos tropicales son los siguientes:

- Impedimento o impedancia mecánica a la penetración de raíces
- Estrés de agua (déficit)
- Estrés de aireación (exceso de agua)
- Escorrentía y erosión

Impedimento mecánico

El impedimento mecánico a la penetración de raíces se refiere a la incapacidad que presenta una raíz cuando su presión de turgencia no es capaz de vencer la resistencia que opone el suelo a su deformación (Taylor, 1980). La máxima presión axial (longitudinal) ejercida por un buen número de cultivos varía para varios investigadores (Stolzy y Barley, 1968; Eavis et al., 1969; Taylor y Ratliff, 1969), entre 9–15 bares (0.9–1.5 MPa). Russell y Goss (1974) demuestran que la aplicación de una presión de 0.2 bares a un sistema de camas de vidrio reduce la tasa de elongación de las raíces de cebada en un 50%, y si se aplican 0.5 bares disminuye en un 80%. El tamaño de los poros afecta el desarrollo de las raíces. Si el diámetro del poro es mayor al de la cofia, la raíz penetra; si es menor y el suelo no es deformable, la raíz no puede penetrar

(Taylor y Gardner, 1960; Aubertin y Kardos, 1965a, 1965b). El impedimento mecánico debido a la compactación y a la presencia de capas endurecidas (adensadas) es la principal causa de disminución de los rendimientos y de insostenibilidad en suelos tropicales, debido a los efectos negativos que causan en el crecimiento de las raíces. El impedimento mecánico se corrige mediante la utilización adecuada y oportuna de implementos de labranza que produzcan aflojamiento del suelo y disminución de la densidad aparente, fundamentalmente subsoladores y cinceles (Arkin y Taylor, 1981; Castro y Amézquita, 1991). Se han ideado varios implementos y metodologías para evaluar el estado de impedancia mecánica del suelo; entre ellos, los penetrómetros, los aparatos para medir la resistencia tangencial al corte, aparatos para toma de muestras de densidad aparente y aparatos para la realización de pruebas de aplicación de presión bajo presiones confinadas y no confinadas en laboratorio. Cualquier metodología que se use para diagnóstico o predicción debe correlacionarse con el crecimiento actual de las raíces y con los rendimientos de los cultivos que se van a producir para poder disponer de niveles críticos.

Estrés de agua

El estrés de agua de las plantas resulta de la interacción entre el estado de humedad de agua en el suelo, la demanda evaporativa y los factores fisiológicos. Dentro del concepto del sistema suelo-planta-atmósfera-continuum, el suelo debe considerarse como un reservorio que suministra agua al sistema (Reichardt, 1985). Por lo tanto, cualquier déficit que ocurra en el reservorio afecta negativamente el comportamiento del sistema. El agua útil o agua aprovechable, aquella que teóricamente se calcula como la diferencia entre capacidad de campo y punto de marchitez temporal, se mueve dentro del sistema suelo-planta-atmósfera obedeciendo a gradientes de potencial hídrico; desde sitios donde el potencial es alto (más húmedo) a sitios donde es más bajo (más seco); desde el suelo hacia la atmósfera a través del proceso de transpiración; desde el suelo donde la humedad relativa es cercana al 100%, hacia la atmósfera donde la humedad relativa al mediodía puede variar entre 50 y 30%, valores que producen potenciales hídricos en el aire entre 8 y 150 MPa y que se convierten en la bomba que succiona el agua del suelo a través de las plantas (Amézquita, 1981).

Para que un suelo cumpla con su función de reservorio de agua es necesario que se cumplan tres condiciones: (a) que buena parte del agua lluvia penetre al suelo, (b) que el suelo tenga buena capacidad de almacenamiento de agua en la zona de crecimiento de raíces, y (c) que el suelo posea suficiente capacidad de conducción de agua cuando la demanda evaporativa sea alta. Estas condiciones son afectadas directamente por la labranza (Amézquita, 1981).

La aceptación (aceptancia) de aguas lluvias depende de la presencia de agregados superficiales estables (que no se rompan cuando reciban el impacto de las gotas de agua lluvia) y de la rugosidad superficial del terreno. Ambas características propician el ingreso del agua al suelo mediante el proceso de la infiltración, y son afectadas negativamente por la destrucción

de la estructura superficial del terreno por exceso de labranza, la cual conduce al sellamiento y encostramiento superficial, fenómenos que impiden o disminuyen drásticamente el ingreso del agua al suelo, haciendo que la escorrentía supere ampliamente a la infiltración, originando suelos secos.

El almacenamiento del agua en el suelo también depende de la labranza que se dé al suelo en profundidad. Entre más profunda sea la preparación del suelo, mayor es su capacidad de almacenamiento de agua. Un suelo preparado a 10 cm de profundidad con rastra dispondrá solo de la porosidad disponible en esos 10 cm para almacenar agua. Un suelo preparado a 25 cm tendrá igualmente la porosidad disponible a 25 cm de profundidad para almacenamiento de agua. Por lo tanto, la capacidad de almacenamiento de agua por el suelo puede ser manejada con la labranza (Reichardt, 1985).

El déficit de agua en un suelo se manifiesta cuando ésta se convierte en factor limitante para la evapotranspiración y cuando la demanda atmosférica está exigiendo que la evapotranspiración sea alta. Dos fenómenos se asocian con el déficit de agua en el suelo: (a) cuando su capacidad de almacenamiento se ha visto disminuida por agotamiento y (b) cuando la velocidad de movimiento del agua en el suelo es mucho más baja que la velocidad de movimiento que exige el sistema evapotranspirativo. Bajo ambas condiciones, el agua se convierte en factor limitante; por ello es necesario que las acciones de labranza corrijan estas situaciones donde quiera que ellas ocurran al aumentar la capacidad de almacenamiento de agua y la conductividad hidráulica no saturada del suelo (Amézquita, 1994).

Déficit de aire

El déficit de aire en el suelo se manifiesta donde quiera que en un lote se produzca inundación. También cuando los valores de aireación a capacidad de campo sean inferiores a 10% en la profundidad de desarrollo de las raíces. Bajo condiciones de baja aireación o de inundación, las raíces de los cultivos de secano no pueden absorber agua ni nutrientes; por lo tanto hay una disminución drástica de los rendimientos. Condiciones de baja aireación pueden crearse por uso excesivo de la maquinaria agrícola, lo cual puede conducir a una disminución gradual de macroporos, cuya presencia es indispensable para el movimiento del aire en el suelo. El uso apropiado de la maquinaria agrícola en suelos con problemas de drenaje restringido puede conducir al mejoramiento temporal o permanente de esta condición, si se aplican las técnicas razonables que conduzcan a mejorar la evacuación de aguas sobrantes y a promover la aireación.

Escorrentía y erosión

El uso inadecuado de la maquinaria agrícola en las labores de preparación de suelos ocasiona grandes problemas de escorrentía y de erosión en el trópico. La mayor cantidad de erosión que actualmente se produce es propiciada por el aflojamiento del suelo al inicio de la temporada

lluviosa. Suelos recién preparados, por presentar terrones y agregados prácticamente sueltos, son muy susceptibles a dejarse desmoronar por el impacto de las gotas y a dejarse acarrear por las aguas de escorrentía. Suelos que no son tocados por implementos de labranza presentan alta resistencia a la erosión, aunque propician la escorrentía. Es necesario, por lo tanto, buscar una condición de equilibrio entre infiltración y escorrentía en suelos susceptibles a erosión, la cual se puede lograr con el uso apropiado de implementos de labranza. El origen de los llamados sistemas conservacionistas, en los cuales el uso de residuos superficiales y la poca manipulación del suelo son condiciones necesarias, es una respuesta del hombre a la lucha contra la erosión y a la pérdida de agua en forma de escorrentía.

Condiciones físicas de los suelos de la altillanura en relación con la labranza

El principal problema a enfrentar en los suelos de la altillanura de los llanos (Typic Haplustox Isohipertérmicos caoliníticos) para su utilización en agricultura y en la producción de pastos, es su susceptibilidad a la degradación. Se entiende como degradación a la pérdida de algunas cualidades físicas, químicas y biológicas del suelo por mala intervención humana, las cuales se convierten en factores negativos de producción; por ende, afectarán la sostenibilidad agrícola en el futuro.

Las principales propiedades físicas de los suelos que son afectadas por sistemas inadecuados de labranza (intervención humana) son aquellas que tienen que ver con el comportamiento volumétrico del suelo, tales como porosidad total y distribución de tamaño de poros, propiedades íntimamente ligadas a la estructura del suelo. Por lo tanto, cualquier cambio en la distribución de tamaño de agregados, y en la estabilidad estructural como consecuencia de la labranza, afecta la infiltración, la capacidad de almacenaje de agua por el suelo, la penetración y crecimiento de las raíces. El sellamiento superficial, producto del desmoronamiento de los agregados y del desprendimiento y salpicadura de partículas (Le Bissonais, 1996), es otro gran problema en los llanos que está asociado con labranza.

Los principales problemas de orden físico que el autor ha observado y evaluado en el campo en suelos de los llanos, son los siguientes:

- Sellamiento superficial
- Encostramiento superficial
- Alta densidad aparente
- Adensamiento y endurecimiento del suelo en la época seca
- Compactación
- Baja velocidad de infiltración
- Baja estabilidad estructural
- Pobre distribución de tamaño de poros
- Pobre continuidad en el espacio poroso

- Poco espesor del horizonte "A"
- Alta susceptibilidad a erosión (suelos recién preparados)
- Alta producción de escorrentía

Ante esta situación, y para el desarrollo de sistemas de labranza que tiendan a la sostenibilidad, se requiere: (a) entender los procesos de degradación que actualmente se presentan en función de tiempo de uso, tipo de suelo y sistemas de manejo; (b) determinar las propiedades (físicas, químicas y biológicas) del suelo que son más afectadas por las prácticas de manejo, así como determinar sus valores críticos para diferentes cultivos; (c) desarrollar metodologías de campo y laboratorio que permitan evaluar en una forma realista las condiciones que limitan el buen desarrollo de los cultivos; y (d) desarrollar prácticas de manejo de suelos que conduzcan a su sostenibilidad para anular los procesos degradativos.

En la Figura 1 se presentan los valores de resistencia a la penetración en Oxisoles de Carimagua, bajo condiciones de sabana nativa y suelo cultivado con arroz. Las evaluaciones se hicieron en tiempo de lluvias (junio) con un penetrógrafo japonés. Bajo la condición de sabana nativa se observa que los valores de penetrabilidad en los primeros 5 cm de profundidad ya alcanzan niveles de alrededor de 3.0 kg/cm², que para las condiciones de suelo húmedo son valores altos (en la estación seca el penetrógrafo no penetra). Los valores incrementan la profundidad indicando que en el perfil de muestreo las raíces pueden sufrir restricciones en su crecimiento. De hecho, bajo condiciones de campo, el mayor porcentaje de raíces se concentra en los primeros 0–2.5 o 0–5.0 cm.

Bajo condiciones de monocultivo de arroz, en los primeros 0–5 cm ya se llega a valores de 6.0 kg/cm² que prácticamente duplican a los de sabana nativa para la misma profundidad. Esto claramente demuestra que el sistema de labranza (rastra) que se ha dado al suelo está incrementando los valores de penetrabilidad. Hacia abajo del perfil, entre 5 y 25 cm de profundidad, los valores permanecen más o menos constantes, indicando que se está formando una capa compactada.

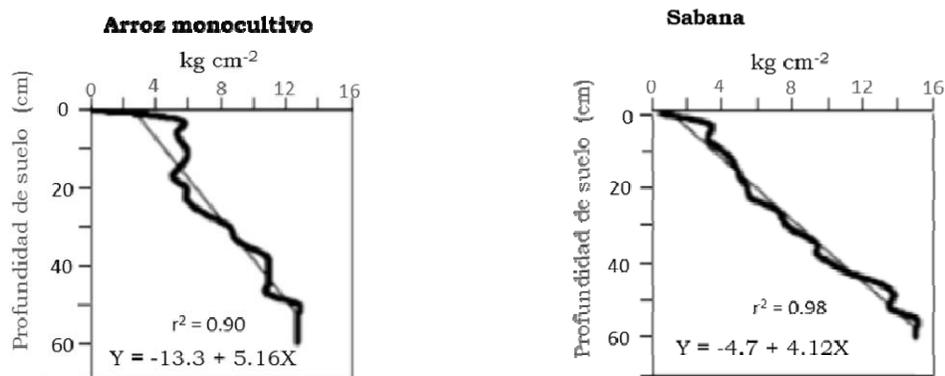


Figura 1. Resistencia a la penetración bajo condición de arroz monocultivo, en comparación con sabana. Ensayo Culticore, Carimagua, 1997.

En la Figura 2 se observa la influencia negativa que el aumento en el número de pases de rastra (Hacienda Matazul – Typic Haplustox Isohipertérmicos caoliníticos) tiene en los rendimientos del arroz. Prácticamente, al pasar de dos a cuatro pases ya se ha afectado la estructura y los rendimientos son menores. Si se reducen los rendimientos en arroz, que es un cultivo muy rústico en los requerimientos de condición física de suelos, es de esperar que otras especies de cereales se vean más afectadas.

El uso creciente de pases de rastra, el sistema más común de preparación de suelos en los llanos, disminuye la densidad aparente en los primeros 5 a 10 cm de profundidad, pero la aumenta a partir de estas profundidades, lo cual es indicativo de que el paso de las rastras a la misma profundidad está causando compactación (pie de rastra). El valor de este parámetro bajo sabana nativa es mayor (1.41 Mg/m^3) entre 0 y 5 cm que entre 5 y 10 cm (1.33 Mg/m^3), lo cual es indicativo de la presencia de una costra densa en la superficie (Cuadro 1).

Los valores de infiltración acumulada (Amézquita y Londoño, 1997) y de velocidad de infiltración (Figuras 3 y 4) muestran que ella es baja. Por lo tanto, la capacidad de aceptación de agua lluvia es baja y los suelos pueden comportarse como suelos secos dentro de un clima húmedo. Bajo esta condición, para la suplencia de agua a los cultivos es más importante la frecuencia de caída de las lluvias que la capacidad de almacenamiento del agua en el suelo. Ésta puede ser una de las razones por las cuales bajo sabana nativa se encuentran la mayoría de las raíces en los primeros 2 cm de suelo, porque a esa profundidad cada lluvia es capaz de mojar el suelo, pero la baja infiltración impide que el agua penetre más profundamente al suelo.

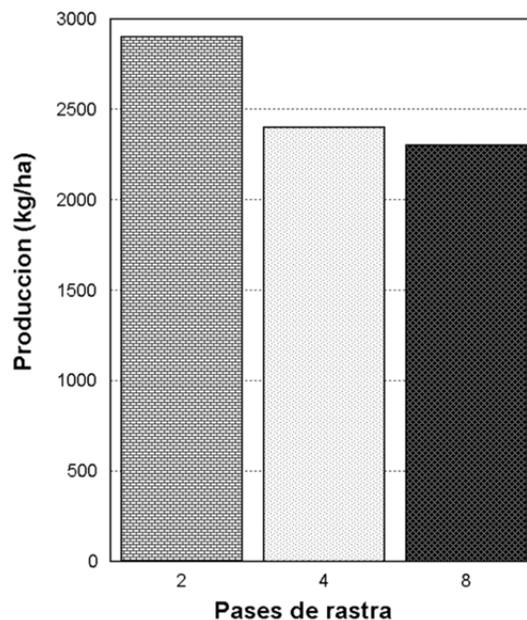


Figura 2. Efectos del número de pases en la producción de arroz. Ensayos Matazul, Llanos Orientales de Colombia.

Cuadro 1. Influencia del número de pases de rastra en la densidad aparente a diferentes niveles de profundidad, Ensayos Matazul, Llanos Orientales de Colombia.

Profundidad (cm)	Sabana nativa	Número de pases de rastra		
		6	12	24
0-5	1.41	1.36	1.28	1.37
5-10	1.33	1.40	1.38	1.33
10-20	1.23	1.42	1.38	1.46
20-30	1.41	1.45	1.36	1.45
30-50	1.46	1.56	1.46	1.48
50-70	1.38	1.56	1.43	1.45

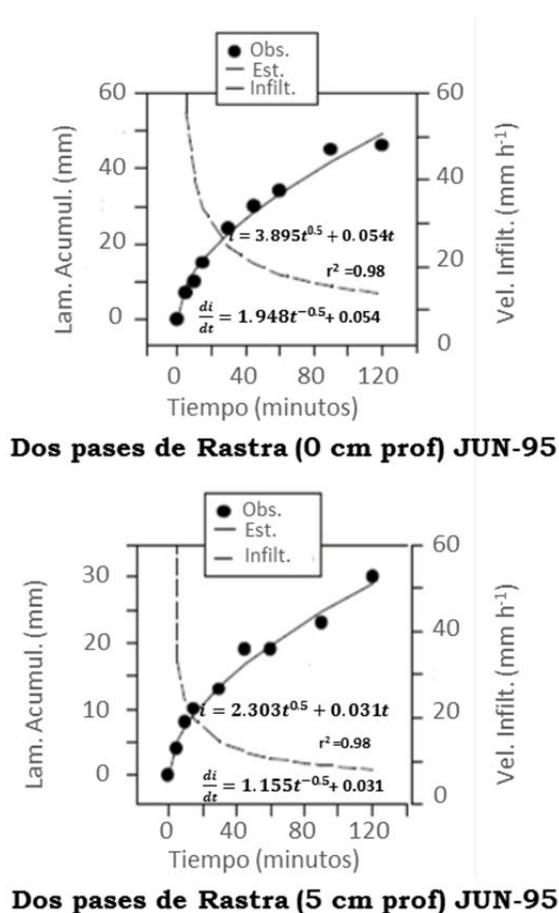


Figura 3. Infiltración acumulada y velocidad de infiltración (dos pases de labranza). Ensayos Matazul, Llanos Orientales de Colombia, junio de 1995.

La distribución de tamaño de agregados tiene relación con la intensidad de uso de la labranza. En la Figura 5 se muestra el comportamiento de la distribución de tamaño de

agregados para diferentes intensidades de labranza (Amézquita et al., 1997). Lo más notorio es que bajo sabana nativa el D50 (1.9 mm) ha disminuido a 0.40 mm bajo monocultivo de arroz (uso intensivo de maquinaria). El D50 es el diámetro límite por debajo o por encima del cual se presenta el 50% de los agregados. El tamaño de los agregados influye bastante en la respuesta de los cultivos a las condiciones que ese tamaño de agregados produce en las condiciones del suelo.

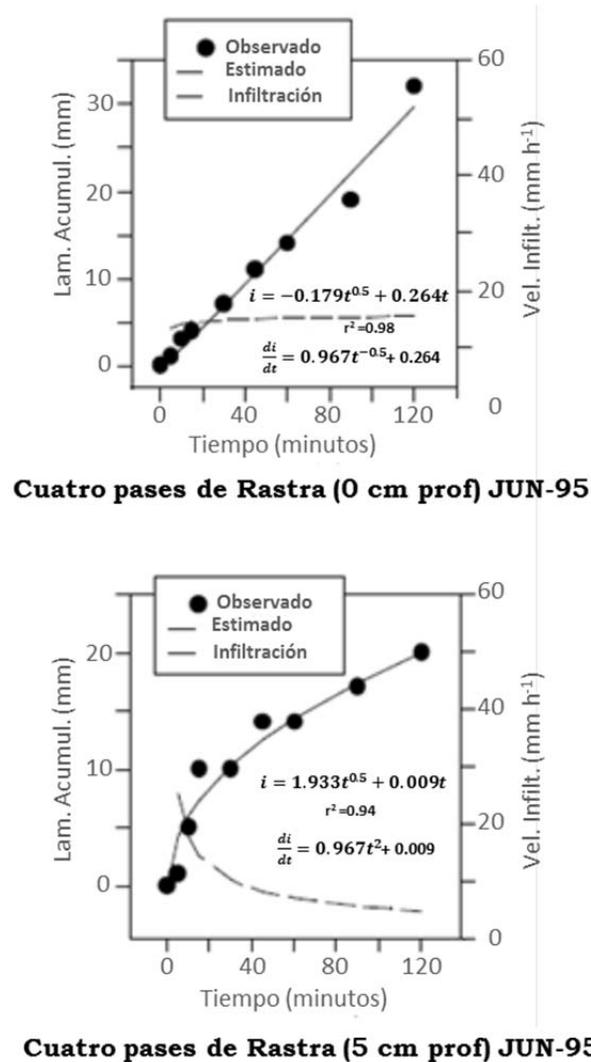


Figura 4. Infiltración acumulada y velocidad de infiltración (cuatro pases de labranza).
Ensayos Matazul, Llanos Orientales de Colombia, junio de 1995.

En el Cuadro 2 se observa que *Brachiaria* respondió significativamente en producción de materia seca, al tamaño de los agregados en que se sembró. El mayor peso seco se obtuvo cuando se sembró en agregados mayores a 4 mm y el menor cuando fueron inferiores a 2 mm. Asimismo, el comportamiento del N en el suelo y en la planta se vio afectado por el tamaño de los agregados (Meléndez, 1998).

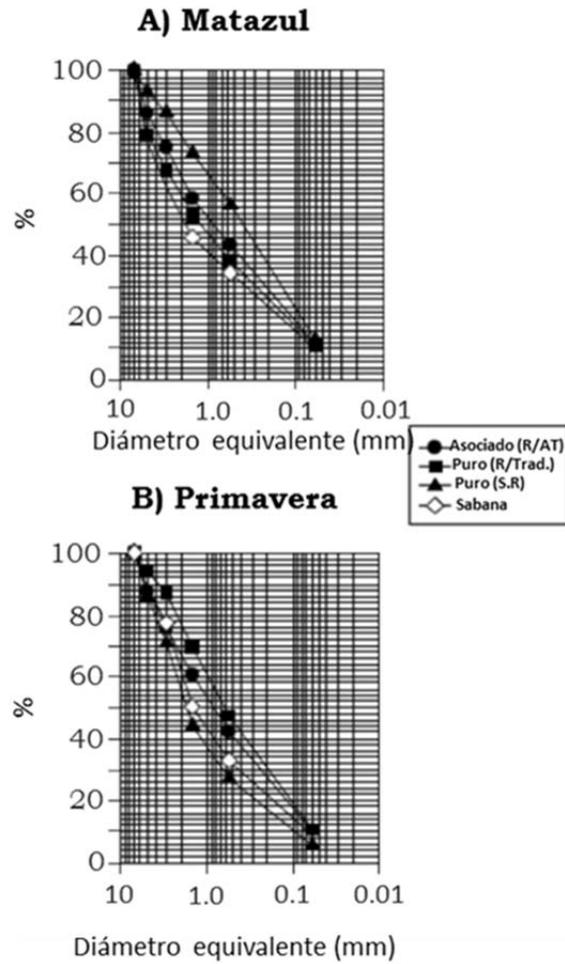


Figura 5. Comportamiento del D50 en agregados superficiales de varios tratamientos de uso y manejo de suelo.

Cuadro 2. Producción de biomasa y absorción por *Brachiaria* en diferentes tamaños de agregados. Llanos Orientales de Colombia.

Tamaño de agregado (mm)	Peso seco (g)	Absorción de N (g/maceta)	N en el suelo (g/g)
>4	21.0 a	0.39 a	37.5 a
4-2	12.7 b	0.31 b	27.0 b
<2	5.0 c	0.13 a	17.6 c
C.V.	25.3	14.0	14.7

Efecto del tiempo de uso en algunas propiedades físicas de suelos del llano

El uso permanente e intensivo de implementos agrícolas en los suelos causa deterioros en su estructura (Quirk y Murray, 1991; Mulla et al., 1992), lo que puede afectar negativamente los rendimientos. A manera de ejemplo cabe citar que los productores de arroz de secano en Casanare abandonan sus lotes después de 5 a 8 años de uso continuo, ya que después de este tiempo los rendimientos, a causa de procesos degradativos, disminuyen notablemente (Preciado, 1997). En estos suelos, la labranza se hace casi que exclusivamente con rastras de diferentes tamaños.

La Figura 6 muestra los datos obtenidos por Preciado (1997), en los que se observan los cambios que se han producido en la porosidad total y en la distribución del tamaño de los poros por efecto del tiempo de uso. Cuando el suelo no se había cultivado, la porosidad total en los primeros 10 cm fue de 60%; después de 20 años de uso se había reducido a 38%, una disminución del 22% que manifiesta que el suelo se ha adensado. Entre 10 y 20 cm, los valores pasaron de 47 a 33%, y entre 20 y 30 cm de 43 a 32%, observándose que hasta la profundidad de muestreo el suelo había reducido fuertemente su volumen. Analizando la distribución de tamaño de poros se observa que los macroporos pasaron de 20% a aproximadamente 3% en la primera profundidad, de 10 a 2% en la segunda y de 10 a 1.5% en la tercera. Se observaron menores cambios en meso y microporos. El hecho de que el volumen de macroporos haya disminuido es un indicativo de degradación de suelos por efecto del uso y del manejo y puede

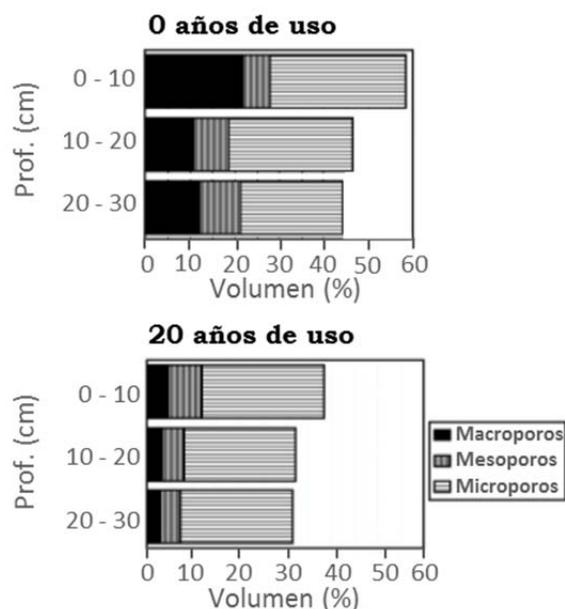


Figura 6. Distribución de tamaño de poros y porosidad total en función de tiempo de uso en suelos arroceros de Casanare.

ser la causa del abandono de los lotes, ya que el agua no puede penetrar y los suelos pierden su capacidad de aireación y de permitir el desarrollo de las raíces.

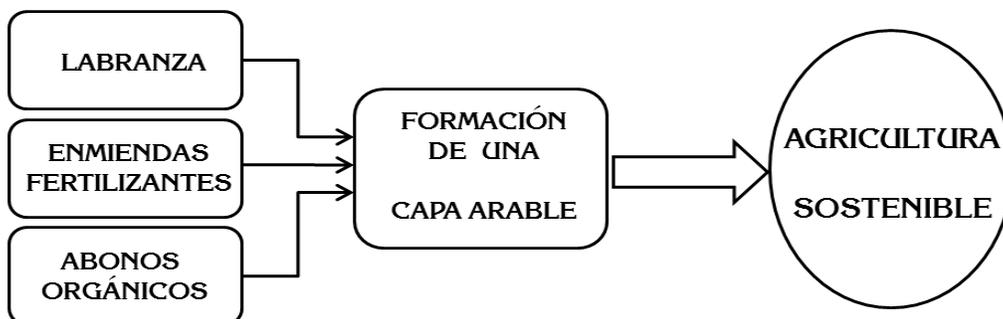
La disminución en el volumen de macroporos, por efecto de un uso no apropiado a las condiciones del suelo, disminuye todos los flujos que tienen que ver con agua y aire en el suelo, afectando negativamente la conductividad hidráulica, la infiltración y la permeabilidad del aire. También se afectan otras propiedades como resistencia tangencial al corte y penetrabilidad, las cuales aumentan sus valores.

Hacia la creación de una capa arable para obtener suelos sostenibles en el llano

La actual condición física de los suelos del llano, especialmente la de altillanura, muestra que las labores de preparación de suelos deberán enfocarse hacia la creación de una "capa arable". Se entiende en el contexto de este capítulo como *capa arable* a aquella capa superficial de suelo planificada y obtenida por el hombre con el fin de obtener un suelo que no presente limitantes físicas, químicas, ni biológicas para el desarrollo normal de las raíces de los cultivos y que sea estable a través del tiempo. La profundidad de ésta puede variar entre 0–15 cm para pastos, 0–25 cm para cereales y leguminosas y 0–40 cm para cultivos permanentes.

Si en el llano no se maneja el concepto de desarrollo de una capa arable, los suelos se seguirán degradando y se harán cada vez más improductivos.

La Figura 7 presenta los conceptos involucrados en el desarrollo o creación de esa capa arable. Mediante la combinación de una labranza que tienda a corregir las limitantes físicas del suelo, de un buen uso y manejo de enmiendas y de fertilizantes que corrijan la condición química hasta la profundidad deseada y del uso de prácticas de manejo de abonos orgánicos, abonos verdes y residuos vegetales que propicien la formación de bioestructura, es posible formar una capa arable y sobre ella una agricultura sostenible.



Los sistemas agro y silvopastoriles tienden a poner en práctica este concepto.

Figura 7. Concepto de perfil cultural: Desarrollo de una capa productiva sin limitantes físicas, químicas y biológicas.

En un suelo que presenta diferentes limitantes que han sido corregidas, ya se pueden hacer labranzas de tipo conservacionista para mantener la condición de alta productividad alcanzada. Si en los suelos de los llanos no se hacen las correcciones que requieren, cualquier sistema de labranza conservacionista que se use será un fracaso porque ellos actualmente no poseen las condiciones requeridas para propiciar un buen crecimiento de las raíces de los cultivos que se establezcan. Si se presentan fracasos en la respuesta a la utilización de sistemas de labranza conservacionista, se corre el riesgo de que una práctica que sobre suelos ya corregidos puede conducirlos a sostenibilidad, sea rechazada por los productores por ineficiente.

El concepto de transformación de suelos sin capa arable a suelos con capa arable se esquematiza en la Figura 8. En ella se muestra cómo, a través del tiempo, es posible ir haciendo correcciones al suelo mediante prácticas de mejoramiento físico, químico y biológico para conseguir un suelo superficial (sin limitaciones). Dentro de los conceptos de mejoramiento del suelo deben considerarse todas aquellas prácticas que conduzcan a aumentar el contenido de materia lignificada (formadora de estructura) dentro y sobre la superficie del suelo, aprovechando que ya se han seleccionado materiales genéticos capaces de crecer en las condiciones adversas de acidez que presentan los suelos del llano. Como sistemas de producción útiles para la obtención de capas arables, cabe mencionar el uso de abonos verdes para llevar la fertilidad del suelo; el uso de programas de rotación de cultivos y el uso obligatorio de sistemas agropastoriles para utilizar los beneficios que los pastos brindan a los suelos como formadores o propiciadores de bioestructura.

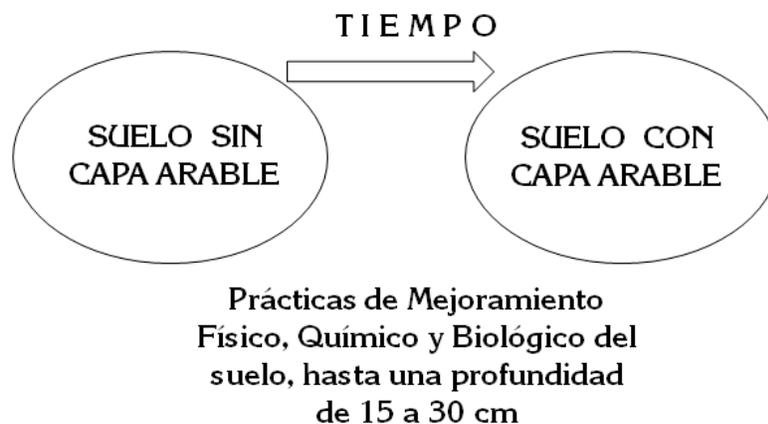


Figura 8. Marco conceptual para la Construcción de una capa arable.

A continuación se definen los objetivos que deben perseguirse desde los puntos físico, químico y biológico para desarrollar suelos sostenibles para el caso de los llanos:

- *Mejoramiento físico:* Se debe mejorar la condición de alta densidad aparente y de alta resistencia a la penetración de los suelos mediante el uso de implementos de labranza vertical (cincales y subsolado superficial hasta 35 o 40 cm) que permitan el rompimiento del suelo en profundidad. Los cincales ideales para este propósito son los rígidos, que son capaces de romper suelos que ofrecen alta resistencia al fraccionamiento. Quien usa cincales debe tener en cuenta que suelos muy adensados o compactados se deben empezar a trabajar primero superficialmente y luego a mayor profundidad hasta lograr la requerida. Si esto no se hace se rompe el tractor o el implemento. Una vez que se ha aflojado el suelo, es necesario "fijar" o "mantener" ese aflojamiento mediante la siembra de pastos o de cultivos de buen sistema radical o mediante la adición de tamos fragmentados, que mantengan la condición lograda con la labranza. Labranzas verticales "fijadas" por un período de 3 a 5 años arrojarán un suelo diferente, sobre el cual se pueden realizar sistemas de labranza conservacionista.
- *Mejoramiento químico:* Éste debe incluir el uso de enmiendas hasta la profundidad a la cual se laboree el suelo y no solo a 10 cm como actualmente se hace, en la cantidad que lo determine el análisis del suelo y con los correctivos que sean necesarios.

También se deben adicionar al suelo los nutrientes necesarios para obtener buenos rendimientos, ya que esto garantiza la formación de una buena cantidad de biomasa externa e interna (raíces), que a la vez actuará como correctivo del suelo.

- *Mejoramiento biológico:* Para éste se sugiere: (a) elevar el contenido de materia orgánica, mediante la promoción de raíces y la incorporación de residuos; (b) incrementar la estabilidad de los agregados mediante la incorporación de materiales orgánicos lignificados y fragmentados (2–3 cm); (c) propiciar el incremento del reciclaje superficial de nutrientes a través del uso del mulch; y (d) propiciar el uso de plantas de raíces profundas para mejorar la condición estructural del suelo en profundidad. Rao et al. (1996) han estudiado la distribución de raíces de pasto en suelos de la altillanura.

Actualmente se llevan a cabo ensayos de campo encaminados a la formación de "capas arables" o de "perfil cultural". El Cuadro 3 muestra algunos de los resultados que hasta ahora se han obtenido. También se observan los cambios de porosidad total obtenidos cuando se pretende conseguir una capa arable por medios biológicos (leguminosa, pasto y pasto-leguminosa) y físicos (cincel 1, cincel 2, cincel 3; los números representan la cantidad de pases paralelos que se realizan).

Cuadro 3. Cambios en la porosidad total (%) como respuesta a los diferentes tratamientos y usos del suelo.

Profundidad (cm)	Sabana nativa (Testigo)	Tratamiento biológico ^a			Tratamiento químico y físico		
		L	P	L + P	Q1	Q2	Q3
0-10	34.0	37.8	44.8	41.7	44.4	46.3	48.6
10-20	34.0	37.0	39.0	42.1	37.1	42.5	40.5
20-30	29.6	35.0	32.3	30.8	33.5	34.2	35.0
30-40	28.8	34.6	29.5	28.0	31.4	36.8	31.8

a. L = leguminosa; P = pasto.

Las siguientes observaciones merecen destacarse:

- Bajo sabana nativa, la porosidad total es baja, no apta para producción agrícola.
- El uso de agentes biológicos ha mejorado la condición de porosidad total hasta 30 cm de profundidad, pero especialmente lo ha hecho la combinación pasto-leguminosa.
- El mejoramiento físico con cincel ha mejorado la porosidad total hasta llevarla a valores muy buenos para producción agrícola. Dicho mejoramiento ha sido función del número de pases y es mejor cuando se hacen tres pases.

El uso de los conceptos presentados satisfacen las recomendaciones de Spoor (1975) y de Soane y Pidgeon (1974) en el sentido de que la labranza no debería definirse en términos de los implementos usados, sino más bien por los cambios en las condiciones físicas del suelo que ellos producen. Glinski y Lipiec (1990) han hecho una buena recopilación de la influencia de las propiedades físicas de los cultivos.

Agradecimientos

El autor expresa sus agradecimientos al Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT) y al Departamento Administrativo de Ciencia, Tecnología e Innovación (Colciencias), sin cuyo apoyo no hubieran podido realizarse las investigaciones que aquí se comentan, como tampoco dar claridad a los nuevos conceptos que de ellas han emanado. Asimismo agradece la colaboración brindada por la Universidad del Llano y por la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (Corpoica).

Referencias

- Allmaras RR; Unger PW; Wilkins DE. 1985. Conservation tillage systems and soil productivity. En: Follet RF; Stewart BA, eds. Soil erosion and crop productivity. American Society of Agronomy, Madison, WI, Estados Unidos. p 357–412.
- Amézquita E. 1981. A study of the water regime of a soil during approach to field capacity and permanent wilting point. Tesis (Ph.D.). University of Reading, Reino Unido. 244 p.
- Amézquita E. 1991. Procesos dinámicos del suelo y nutrición vegetal. XXI Congreso Anual y Primer Simposio sobre Fisiología de la Nutrición Mineral. COMALFI, febrero 20–22. Manizales, Colombia.
- Amézquita E. 1994. Las propiedades físicas y el manejo productivo de los suelos. En: Silva F, ed. Fertilidad de suelos: Diagnóstico y control. Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo, Colombia. p 137–154.
- Amézquita E; Londoño H. 1997. La infiltración del agua en algunos suelos de los Llanos Orientales y sus implicaciones en su uso y manejo. *Revista Suelos Ecuatoriales* 27:163–168.
- Amézquita E; Sanz JI; Thomas RJ; Vera RR; Hoyos P; Molina DL; Chávez LF. 1997. Características estructurales de los suelos de los Llanos Orientales de Colombia sometidos a varios sistemas de manejo. *Revista Suelos Ecuatoriales* 27:151–156.
- Arkin GF; Taylor HM, eds. 1981. Modifying the root environment to reduce crop stress. ASAE Monograph No. 4. American Society of Agricultural Engineers, St. Joseph, Michigan, IL, Estados Unidos. 407 p.
- Aubertin GM; Kardos LT. 1965a. Root growth through porous media under controlled conditions. I. Effect of pore size and rigidity. *Soil Science Society of America Journal* 29(3):290–293.
- Aubertin GM; Kardos LT. 1965b. Root growth through porous media under controlled conditions. II. Effect of aeration levels and rigidity. *Soil Science Society of America Journal* 29(4):363–365.
- Castro H; Amézquita E. 1991. Sistemas de labranza y producción de cultivos en suelos con limitantes físicos. *Revista Suelos Ecuatoriales* 21(1):21–28.
- CTIC (Conservation Technology Information Center). 1993. Conservation tillage definitions and types of systems. *Conservation Impact* 11(5):6.
- Eavis BW; Ratliff LF; Taylor HM. 1969. Use of a dead-load technique to determine axial root growth pressure. *Agronomy Journal* 61:640–643.
- Figuerola SB; Morales FF. 1992. Manual de producción de cultivos con labranza de conservación. Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos y Colegio de Postgraduados, Montecillo, México. 273 p.

- Gill WR; Vanden Berg GE. 1967. Soil dynamics in tillage and traction. Agriculture Handbook No. 316. Agricultural Research Service, United States Department of Agriculture. 511 p.
- Glinski J; Lipiec J. 1990. Soil physical conditions and plant roots. CRC Press Inc., Boca Raton, FL, Estados Unidos. 249 p.
- Greenland DJ. 1977. Structural organization of soil and crop production. En: Greenland DJ; Lal R, eds. Soil physical conditions and crop production in the tropics. John Wiley & Sons, Chichester, Reino Unido. p 45–57.
- Hillel D; Ariel D; Orlowski S; Stibbe E; Wolf D; Yavnai A. 1969. Soil-crop tillage interactions in dryland and irrigated farming. Final technical report submitted to the U.S. Department of Agriculture by the Hebrew University of Jerusalem, Jerusalén, Israel. 300 p.
- Lal R. 1993. Tillage effects on soil degradation, soil resilience, soil quality and sustainability. Soil & Tillage Research 27(1–4):1–8.
- Lal R. 1994. Methods and guidelines for assessing sustainable use of soil and water resources in the tropics. SMSS Technical Monograph No. 21. Department of Agronomy, The Ohio State University, Columbus, OH, Estados Unidos. 78 p.
- Laryea KB; Pathak P; Katyal JC, eds. 1997. Measuring soil processes in agricultural research. Technical Manual No. 3. International Crops Research Institute for the Semi-Arid Tropics (ICRISAT); Central Research Institute for Dryland Agriculture (CRIDA), Andhra Pradesh, India. 100 p.
- Le Bissonnais Y. 1996. Aggregate stability and assessment of soil crustability and erodibility. I. Theory and methodology. European Journal of Soil Science 47:425–437.
- Mannering JV; Fenster CR. 1983. What is conservation tillage? Journal of Soil and Water Conservation 38:141–143.
- Meléndez R, A. 1998. Efecto de tres tamaños de agregados de suelos provenientes de los Llanos Orientales en el ambiente físico y en la respuesta a la fertilización nitrogenada del pasto *Brachiaria decumbens*. Tesis. Universidad Nacional de Colombia, Sede Palmira, Colombia. 87 p.
- Mulla DJ; Huyck LM; Reganold JP. 1992. Temporal variation in aggregate stability on conventional and alternative farms. Soil Science Society of America Journal 56(5):1620–1624.
- Orozco D, OL. 1991. Caracterización física y dinámica del agua bajo tres sistemas de labranza en un Andisol de la antigua serie Tibaitatá. Tesis (M.Sc.). Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Agronomía, Colombia. 122 p.
- Preciado LG. 1997. Influencia del tiempo de uso del suelo en las propiedades físicas, en la productividad y sostenibilidad del cultivo de arroz en Casanare. Tesis (M.Sc.). Universidad Nacional de Colombia, Sede Palmira, Colombia. 111 p.

- Quirk JP; Murray RS. 1991. Towards a model for soil structural behaviour. *Australian Journal of Soil Research* 29:829–867.
- Rao IM; Borrero V; Ricaurte J; García R; Ayarza MA. 1996. Adaptive attributes of tropical forage species to acid soils. II. Differences in shoot and root growth responses to varying phosphorus supply and soil type. *Journal of Plant Nutrition* 19(2):323–352.
- Reichardt K. 1985. Procesos de transferencia no sistema solo-planta-atmósfera. 3a. ed. Publicación Especial del Centro de Energia Nuclear na Agricultura (CENA-USP) y la Fundación Cargill, Brasil. 285 p.
- Russell RS; Goss MJ. 1974. Physical aspects of soil fertility. The response of roots to mechanical impedance. *Netherlands Journal of Agricultural Science* 22(4):305–318.
- Soane BD; Pidgeon JD. 1974. Tillage requirement in relation to soil physical properties. *Soil Science* 119(5):376–384.
- Spoor G. 1975. Fundamental aspects of cultivation. En: *Soil physical conditions and crop production*. Ministry of Agriculture, Food and Fisheries Technical Bulletin No. 29. Her Majesty's Stationery Office (HMSO), Londres, Reino Unido. p 128–145.
- SSSA (Soil Science Society of America). 1987. Glossary of soil science terms. Madison, WI, Estados Unidos. 44 p.
- Stolzy LH; Barley KP. 1968. Mechanical resistance encountered by roots entering compact soils. *Soil Science* 105:297–301.
- Taylor HM. 1980. Mechanical impedance to root growth. En: *Soil related constraints to food production in the tropics*. International Rice Research Institute (IRRI), Los Baños, Laguna, Filipinas. p 389–404.
- Taylor HM; Gardner HR. 1960. Use of wax substrates in root penetration studies. *Soil Science Society of America Proceedings* 24:79–81.
- Taylor HM; Ratliff LF. 1969. Root growth pressures of cotton, peas and peanuts. *Agronomy Journal* 61:398–402.

CAPÍTULO 4

Culticore, Ensayo de Largo Plazo para el Desarrollo de Sistemas de Producción Sostenibles en Suelos Ácidos de Sabanas

D. Friesen¹, E. Amézquita², I. M. Rao³ y J. H. Bernal⁴

Resumen

Culticore, ensayo colaborativo entre el Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT) y la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (Corpoica), fue establecido en el Centro Nacional de Investigación (CNI) en Carimagua, Llanos Orientales de Colombia (4° 37' N, 71° 19' O y 175 m.s.n.m.), en suelos de baja fertilidad, textura franco arcillo limosa clasificados como Typic Haplustox Isohipertérmicos caoliníticos, para el desarrollo de sistemas de producción sostenible en Oxisoles de los Llanos Orientales. Este ensayo se realizó entre 1993 y 2001 y comprendió dos fases: en la Fase I, iniciada en 1993 y evaluada durante 5 años, la estrategia consistió en la selección de sistemas extremos de producción, tales como sistemas en monocultivo de arroz y maíz y establecimiento de pasturas mejoradas mediante cultivos (arroz-*Brachiaria humidicola*-leguminosas y maíz-*Panicum maximum*-leguminosas). Estos sistemas de producción extremos se utilizaron para comparar entre las alternativas menos y más adecuadas, respectivamente. Además se evaluaron opciones intermedias en sistemas de rotación con leguminosas, tanto para producción de grano como para incorporación como abono verde (arroz-caupí y maíz-soya) y la sabana nativa como control. La selección de los sistemas se basó en la tolerancia de los componentes a la acidez en el suelo; por consiguiente, se consideró la aplicación de dosis variables de cal, 500 y 2000 kg/ha, para sistemas basados en los cultivos de arroz y maíz, respectivamente. Todos los sistemas se manejaron para optimizar la producción y minimizar la degradación del suelo. Se utilizaron prácticas de conservación de residuos de cosechas, mantenimiento de los niveles de fertilidad en el suelo, y se realizó control de enfermedades, plagas y malezas. En forma periódica se realizaron mediciones y observaciones de las propiedades físico-químicas del suelo y se evaluó el impacto de los cambios en la productividad de los sistemas, en el uso eficiente de los recursos e insumos y en el ambiente. En la Fase II se evaluó el efecto residual

-
1. Química de suelos/Agronomía, Consultor Internacional, Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo (CIMMYT), Addis Ababa, Etiopía. d.friesen@cgiar.org
 2. Física de suelos, Consultor Internacional. eamezquitac@gmail.com
 3. Fisiología y Nutrición de plantas, Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), Cali, Colombia. i.rao@cgiar.org
 4. Fisiología vegetal, Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (Corpoica), C.I. La Libertad, Villavicencio, Colombia. jhbernal@corpoica.org.co

del establecimiento de sistemas agropastoriles de la Fase I, mediante sistemas de labranza de conservación que incluyeron labranza cero y labranza mínima en sistemas de arroz y maíz en rotación con soya. Se hizo énfasis en la aplicación de estrategias para el establecimiento y mantenimiento de capa arable para asegurar su sostenibilidad, así como en la identificación y cuantificación de los procesos biofísicos de los suelos que contribuyen a la estabilización de los sistemas de producción agropecuarios.

Palabras claves: Oxisoles, sistemas agropastoriles, sistemas en rotación, labranza de conservación

Introducción

La intensificación de la producción agrícola y pecuaria en suelos ácidos de las sabanas de América Latina, está limitada por la falta de diversidad de germoplasma tolerante a la acidez y a la baja fertilidad del suelo. El uso de niveles altos de insumos, especialmente en sistemas en monocultivo, no permite garantizar la sostenibilidad de la producción generando como resultado el deterioro de las características del suelo, especialmente de las físicas ocasionando la reducción de la producción y el incremento en los problemas de plagas y enfermedades.

El mejoramiento de pasturas con base en el uso de leguminosas forrajeras es una práctica muy conveniente de manejo en la medida en que preserva el suelo y mejora la productividad de los sistemas. Sin embargo, esta tecnología demanda una inversión adicional para su establecimiento, lo cual hace que sea poco atractiva para los productores acostumbrados a manejar sistemas de ganadería extensiva con poca inversión.

El establecimiento de pasturas mejoradas en asociación con arroz es un sistema de producción que permite recuperar la inversión del establecimiento de las pasturas, razón por la cual ha sido ampliamente adoptado en áreas de la frontera agrícola de los Llanos Orientales de Colombia. Los agricultores perciben el efecto negativo de siembras continuas de arroz monocultivo, dando como resultado degradación de los suelos y, en consecuencia, disminución en los rendimientos, a pesar del beneficio económico en el corto tiempo. Por tanto, se requieren alternativas con componentes de manejo que contribuyan a la reducción de los efectos deletéreos del monocultivo. El monitoreo de los sistemas de producción puede realizarse mediante el desarrollo de mediciones de indicadores de sostenibilidad para predecir tanto el desempeño de los sistemas de producción agrícola y pecuaria como sus efectos en el suelo. Las leguminosas de grano, los abonos verdes, los cultivos en asociación y el establecimiento de pasturas mejoradas mediante cultivos transitorios, hacen parte de los posibles componentes de manejo que podrían incrementar la estabilidad y sostenibilidad de los sistemas que incluyen cultivos anuales.

Culticore, Ensayo colaborativo entre el Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT) y la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (Corpoica) para el desarrollo

sostenible del sector agrícola, fue establecido en el Centro Nacional de Investigación (CNI) en Carimagua, Llanos Orientales de Colombia, en 1993.

Fase I

El propósito de la Fase I del Ensayo Culticore fue desarrollar investigaciones con una selección de sistemas de producción donde se incluyeron como componentes rotaciones de cultivos con leguminosas, tanto para la producción de grano como para la incorporación como abono verde, establecimiento de pasturas mediante cultivos y sistemas en monocultivo como testigos, y sabana nativa como sistemas de referencia. Los sistemas de producción estuvieron basados en dos niveles de insumos (especialmente cal), determinados fundamentalmente por la tolerancia de los componentes a los factores de la acidez en el suelo; un primer nivel correspondió al uso de cal como fuente de Ca y Mg, para los sistemas basados en el cultivo del arroz; y un segundo nivel a aplicaciones de cal usada como enmienda, para los sistemas basados en el cultivo de maíz. En el transcurso del ensayo se realizó un monitoreo continuo bajo condiciones controladas para identificar indicadores de sostenibilidad de sistemas agropastoriles en suelos ácidos de sabanas. Debido a la interacción de procesos en la contribución a la estabilidad de los sistemas, la información fue recolectada de manera sistemática para desarrollar un modelo integrado, capaz de simular los efectos de los componentes y el manejo de los sistemas de producción en la evaluación de la sostenibilidad, determinada por los predictores. La manifestación de los efectos tanto deletéreos (monocultivos) como benéficos (rotaciones y establecimiento de las pasturas), a menudo sutiles, fueron evaluadas en períodos largos de tiempo, implicando la experimentación a largo plazo, que incluyó dos fases de experimentación comprendidas entre 1993–2001.

Objetivos

General

Desarrollar sistemas de producción sostenibles y competitivos para el manejo de suelos ácidos de sabana de los Llanos Orientales de Colombia.

Específicos

- Contrastar mediciones físico-químicas de suelo relacionadas con la sostenibilidad en sistemas de producción con diferentes potenciales de degradación, y con base en ellas desarrollar indicadores del estado de los sistemas.
- Conocer y cuantificar los procesos biofísicos del suelo que interactúan y contribuyen a la estabilidad de un sistema de producción determinado.
- Desarrollar una base de datos para modelos de simulación de cultivos, los cuales pueden ayudar en la evaluación y extrapolación de los efectos de los componentes de los sistemas y en prácticas de manejo de cultivos para garantizar su sostenibilidad.

Hipótesis

- Los sistemas en monocultivo causan degradación de suelo e incrementan las poblaciones de plagas, enfermedades y malezas; por tanto son de baja sostenibilidad.
- Las pasturas mejoradas asociadas con leguminosas forrajeras son sistemas sostenibles de mediano a largo plazo, pero requieren insumos para mantenimiento y renovaciones periódicas.
- La degradación de suelo puede ser reducida o corregida mediante la rotación de cultivos (monocultivos) o establecimiento de pasturas mejoradas.
- La aplicación de insumos (nutrientes y/o cal) es requerida para mantener la productividad y sostenibilidad de los sistemas.
- Los sistemas en rotación reducen las pérdidas y aumentan la eficiencia en el uso de los nutrientes de los fertilizantes.

Materiales y métodos

Estrategia

Para la Fase I del Ensayo Culticore se seleccionaron sistemas extremos de producción, incluyendo monocultivos y pasturas mejoradas, los cuales sirven como controles. Para contrastar se establecieron opciones intermedias en sistemas en rotación de largo plazo (5 años). La selección de los sistemas se basó en los siguientes principios:

- Tolerancia de los componentes a la acidez en el suelo; por consiguiente se considera la aplicación de dosis variables de cal.
- Estrategias para el mantenimiento del pH en el suelo.
- Selección de la mejor propuesta de cultivos y especies de germoplasma de pasturas para el ambiente agroeconómico en estudio.

Todos los sistemas se manejan para optimizar la producción y minimizar la degradación del suelo. Se utilizan prácticas de conservación de residuos de cosechas; se mantienen los niveles de fertilidad en el suelo y se controlan malezas y plagas.

Localización

Los trabajos se realizaron en suelos franco arcilloso limosos bien drenados (Typic Haplustox Isohipertérmicos caoliniticos) en condiciones de sabana nativa en el CNI de Corpoica, localizado en Carimagua (4° 37' N, 71° 19' O y 175 m.s.n.m.), Llanos Orientales de

Colombia. En el sitio, el promedio de la precipitación anual es de 2240 mm y la temperatura de 27 °C. Los suelos se caracterizan por tener un pH aproximado de 4.5, valores muy bajos de Ca intercambiable, Mg, K y P, y una saturación de Al muy alta ($\approx 90\%$).

Diseño experimental

Los tratamientos en campo se distribuyeron en un diseño de bloques al azar con cuatro repeticiones, tanto para los sistemas basados en el cultivo de arroz como para los sistemas basados en el cultivo de maíz.

Tratamientos

La definición de los tratamientos se realizó con base en la tolerancia de los cultivos a la acidez del suelo, de la siguiente manera: (i) tratamientos con aplicaciones de cal como fertilizante (500 kg/ha), basados en el cultivo del arroz (T1 a T5) y (ii) tratamientos con aplicaciones de cal como enmienda (2000 kg/ha), basados en el cultivo de maíz (T6 a T10). El Cuadro 1 muestra los tratamientos y la descripción del manejo de los sistemas de producción. La selección de los sistemas basados en aplicación de cal como fertilizante —para suministrar Ca y Mg en cultivos y especies de gramíneas tolerantes al Al soluble en el suelo— o la aplicación de cal como enmienda —para rebajar la concentración de Al y permitir la producción de especies sensibles a este elemento. Los tratamientos incluyeron monocultivos, rotación con leguminosas para producción de grano, rotación con leguminosas para incorporación como abono verde y establecimientos de pasturas mediante cultivos y la sabana nativa como control.

Tamaño de parcelas

El tamaño de las parcelas experimentales se basó en el área total requerida para mantener 3 animales, con una carga equivalente a 2 animales/ha, haciendo rotaciones en las repeticiones y considerando la posibilidad de subdividir las parcelas posteriormente. Las altas dimensiones de las parcelas permitieron además el uso de maquinaria agrícola convencional, con el fin de evaluar su efecto en las propiedades físicas del suelo.

Los tratamientos de cultivos-pasturas se asignaron en parcelas adyacentes (no al azar) para facilitar el suministro de agua y el manejo de los animales. Los tamaños de las parcelas fueron de 3600 m² (200 × 18 m o 180 × 20 m) para rotaciones de cultivos y de 7200 m² (200 × 36 m o 180 × 40 m) para el sistema cultivo-pasturas (Figura 1).

Implementación

El Ensayo Culticore en la Fase I se implementó en dos etapas: en 1993 se iniciaron las rotaciones basadas en niveles de cal como fertilizante, sistemas basados en el cultivo de arroz; en 1994 se iniciaron las rotaciones basadas en la aplicación de cal como enmienda, sistemas basados en el cultivo de maíz. Durante 1993 se iniciaron simultáneamente ensayos satélites para evaluar tanto el efecto de algunas prácticas agronómicas en el manejo de los cultivos, como los residuos de cosecha de la producción de maíz monocultivo y en rotación.

Cuadro 1. Descripción de los tratamientos. Primer ciclo agropastoril, 5 años.

Tratamiento No.	Sistemas de producción	Descripción
1	Arroz monocultivo	Arroz monocultivo; sembrado el primer semestre, un cultivo por año; luego, las parcelas son dejadas en barbecho durante el segundo semestre; se realiza preparación temprana de suelo al final de la época lluviosa (diciembre).
2	Rotación arroz-caupí (producción de grano)	Arroz (sembrado el primer semestre) en rotación con caupí (sembrado el segundo semestre), cada año; caupí cosechado para grano; los residuos se incorporan antes de la siembra en la siguiente época lluviosa.
3	Rotación arroz-caupí (abono verde)	Arroz (sembrado el primer semestre) en rotación con caupí (sembrado el segundo semestre); el caupí es incorporado como abono verde, cuando alcance un nivel máximo de biomasa, avanzada la época de lluvias (noviembre-diciembre).
4	Sabana nativa	Sabana nativa en condición natural, manejada de manera tradicional con quema durante la época seca.
5	Arroz/pastura	Establecimiento de la pastura de <i>Brachiaria humidicola</i> / <i>Centrosema acutifolium</i> / <i>Stylosanthes capitata</i> / <i>Arachis pintoii</i> , mediante el cultivo de arroz, sembrado el primer año; mantenida con una población adecuada de leguminosas; renovada cada 4 o 5 años, dependiendo de la composición de la pastura. Manejada con pastoreo.
6	Maíz monocultivo	Maíz monocultivo; sembrado el primer semestre, un cultivo por año; luego, las parcelas son dejadas en barbecho durante el segundo semestre; se realiza preparación temprana de suelo al final de la época lluviosa (diciembre).
7	Rotación maíz-soya (producción de grano)	Maíz (sembrado el primer semestre) en rotación con soya (sembrada el segundo semestre), cada año; la soya cosechada para grano; luego, los residuos se incorporan antes de la siembra en la siguiente época lluviosa.
8	Rotación maíz-soya (abono verde)	Maíz (sembrado el primer semestre) en rotación con soya (sembrada el segundo semestre); la soya incorporada como abono verde, cuando alcance un nivel máximo de biomasa, avanzada la época de lluvias (noviembre-diciembre).
9	Sabana nativa	Sabana nativa en condición natural, manejada de manera tradicional con quema durante la época seca.
10	Maíz/pastura	Establecimiento de la pastura de <i>Panicum maximum</i> / <i>Glycine wightii</i> / <i>Arachis pintoii</i> , mediante el cultivo de maíz, sembrado el primer año; mantenida con una población adecuada de leguminosas y renovada cada 4 o 5 años, dependiendo de la composición de la pastura.

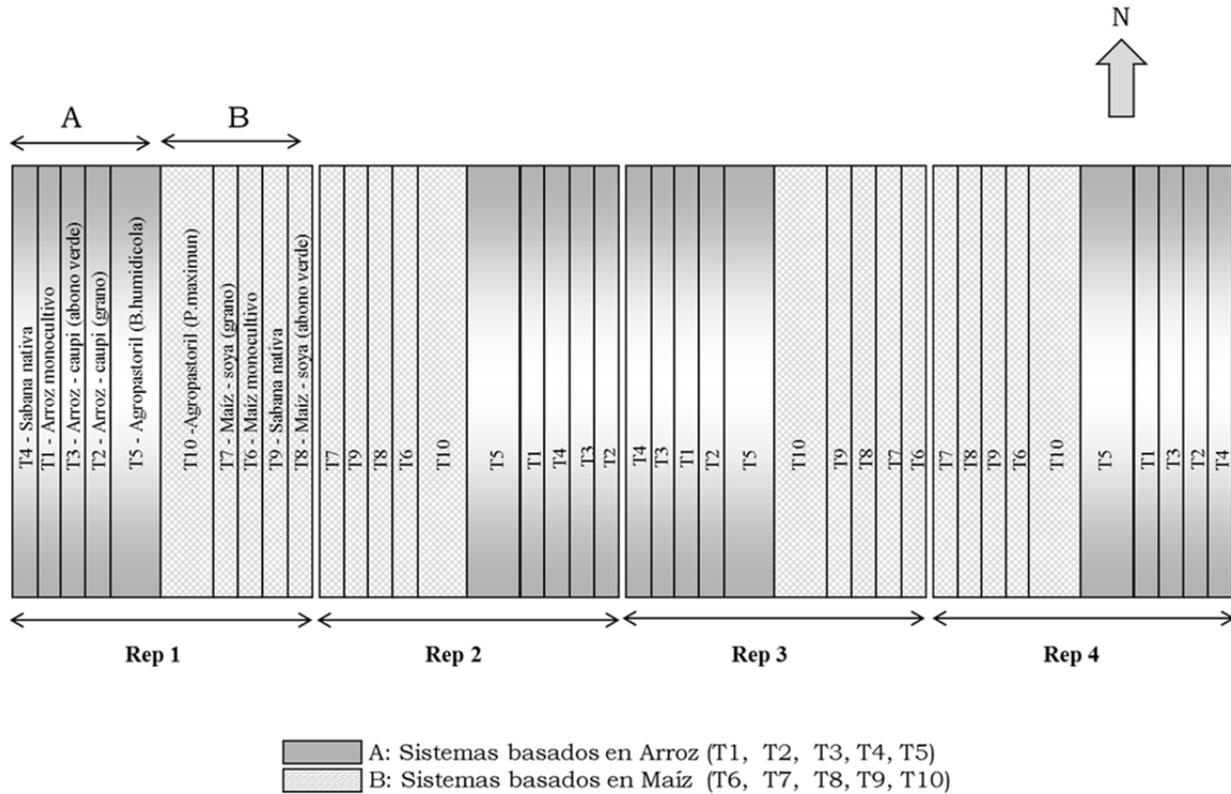


Figura 1. Distribución de los tratamientos en campo. Fase I, Ensayo Culticore, CNI, Carimagua, Llanos Orientales de Colombia.

Manejo y dosis de fertilizantes y encalado

La fertilización y las dosis aplicadas se basan en los requerimientos de cada cultivo complementado por el análisis de suelo y ensayos de respuesta a tasas de fertilizantes en parcelas pequeñas. Los ajustes necesarios se realizan con información generada durante el ensayo. Los sistemas que incluyen pasturas se encalan solo antes del establecimiento del cultivo; los demás reciben aplicaciones de cal cada año. Las dosis se seleccionan para mantener la disponibilidad de Ca y Mg o la saturación de Al en los niveles recomendados.

La cal se aplica a voleo y se incorpora con un pase de rastra entre 3 y 4 semanas antes de la siembra. Los fertilizantes se aplican de la siguiente forma: P como superfosfato simple (SFT); K como cloruro de potasio, una tercera parte de dosis total; Mg como Kieserita o $MgSO_4 \cdot H_2O$; Zn ($ZnSO_4$); y B (bórax) en bandas a 5 cm de la semilla al momento de la siembra. El N se aplica a voleo como urea aproximadamente a las 2, 6 y 9 semanas después de la siembra. La segunda y tercera aplicación de K se hace con la urea a las 6 y 9 semanas después de la siembra (Cuadro 2).

Cuadro 2. Requerimiento inicial de fertilización.

Nutriente	Fuente	Nutriente (%)	Arroz ^a		Maíz ^a		Caupí-soya ^b		
			Nutriente	Fertilizante	Nutriente	Fertilizante	Nutriente	Fertilizante	
			(kg/ha)						
Ca, Mg	Dolomita	10 Mg	50 Mg	500	—	2000	—	—	
N	1ra	Urea	46	20	43	40	87	20	43
	2da	Urea	46	30	65	40	87	0	0
	3ra	Urea	46	30	65	40	87	0	0
P	SPT	20	60	30	80	400	40	200	
K	KCl	51	33	65	33	65	30	59	
Mg	MgSO ₄ .H ₂ O	17	15	87	15	87	10	59	
S		23	20		20		13		
Zn	ZnSO ₄ .6H ₂ O	24	10	42	10	42	10	42	
B	Bórax	11	0	0	10	90	0	0	

a. Monocultivo y asociado con pasturas.

b. Producción de grano y manejado como abono verde.

Preparación de suelo y manejo de malezas

En diciembre de 1992, antes del establecimiento del Ensayo, se quemó la sabana nativa y posteriormente se aró en todos los tratamientos de cultivos, excepto en la sabana nativa. La labranza convencional se realizó en todos los tratamientos, excepto en el tratamiento 9A; sin embargo, la intensidad de preparación del suelo dependió de cada tratamiento, así como de la necesidad de controlar malezas y de incorporar los abonos verdes y los residuos de cosecha (Cuadro 1). Las malezas fueron controladas especialmente con el uso de labranza dirigida en la época apropiada y con prácticas agronómicas para reducir su invasión y crecimiento; entre ellas, densidades apropiadas de siembra y distancia entre surcos. No obstante, se usaron herbicidas en dosis reducidas para el control de malezas, cuando la labranza no fue efectiva; así, en el tratamiento 9A el uso de los herbicidas fue necesario para controlar las malezas debido a la labranza mínima.

Manejo de plagas y enfermedades

Éstas se monitorearon durante las diferentes etapas del cultivo y cuando fue necesario se aplicaron agentes de control biológicos principalmente, para cumplir con los protocolos del manejo integrado de plagas (MIP).

Manejo y utilización de pasturas

El objetivo principal en el manejo de las pasturas fue el mantenimiento de un porcentaje de leguminosas adecuada para sostener la producción de las gramíneas y evitar la degradación de las pasturas. La carga animal base fue aproximadamente de 3 animales /ha, pero se varió

según los requerimientos para mantener un nivel apropiado de oferta de biomasa y para controlar la competencia entre gramíneas y leguminosas. Cada parcela se dividió en dos partes de igual tamaño, de manera que permitió rotación cada 2 semanas.

Mediciones y observaciones

En forma periódica se realizaron mediciones y observaciones de las propiedades físico-químicas del suelo y se evaluó el impacto de los cambios en la productividad de los sistemas, en el uso eficiente de los recursos e insumos y en el ambiente. Se realizó un banco de muestras de suelo, para un posible uso en el futuro, de muestras de suelo tomadas regularmente de cada tratamiento a las diferentes profundidades. A continuación se incluye un resumen de las principales observaciones y mediciones de campo y laboratorio realizadas en el Ensayo Culticore. Durante el transcurso de las investigaciones se introdujeron nuevas variables y se hizo énfasis en algunas consideradas más relevantes.

Observaciones en cultivos y abonos verdes

1. Rendimiento de grano y/o producción de materia seca.
2. Biomasa y distribución de raíces.
3. Dinámica de malezas.
4. Concentración de nutrientes en los productos y subproductos, tanto del cultivo como de los abonos verdes.
5. Parámetros fenológicos de los cultivos y de cosecha para desarrollar modelos de simulación de cultivos (IBSNAT *minimum data set*).

Observaciones en pasturas

1. Composición botánica cada 3 meses.
2. Oferta de biomasa en intervalos de 3 meses.
3. Concentración de nutrientes en los forrajes.
4. Carga animal y ganancias de peso vivo.
5. Biomasa y distribución de raíces.

Propiedades físicas del suelo

1. Densidad aparente.
2. Porosidad y tasa de infiltración.
3. Estabilidad de agregados.
4. Compactación (resistencia a penetrómetro).
5. Contenido de humedad en el suelo con base en peso, antes de la siembra y después de la cosecha.

Propiedades químicas de suelo

1. Materia orgánica: cantidad y calidad.
2. Acidez del suelo: pH, Al y H intercambiables.
3. Cationes intercambiables: Ca, Mg, K.
4. N-suelo: N total, NH₄ y NO₃, N mineralizable.

5. P-suelo: disponible (Bray-2, Olsen, P inorgánico),
P débil (^{32}P intercambiable),
P orgánico e inorgánico (fraccionamiento por Hedley),
P microbial.
6. S-suelo: disponible SO_4 .
7. S total.

Biología de suelo

1. Poblaciones y dinámica de lombrices.

Datos meteorológicos (IBSNAT minimum data set)

1. Temperatura mínima y máxima diaria.
2. Precipitación diaria.
3. Radiación solar diaria.
4. Humedad relativa.
5. Velocidad del viento.

Evaluación de procesos (estudios en microparcels y ensayos satélites)

1. Fijación de N_2 por los componentes de las leguminosas.
2. Velocidad de mineralización o pérdidas de nutrientes orgánicos (N, P y S) o inorgánicos (K, Ca, Mg) desde los residuos de cultivos, abonos verdes y pasturas.
3. Balance de nutrientes (incluyendo los fertilizantes). Cuantificación de las pérdidas de nutrientes por lixiviación, fijación y volatilización.
4. Dinámica de P orgánico y P inorgánico en el suelo.

Agradecimientos

A Horacio Carmen, Agronomía de cultivos, leguminosas y abonos verdes, de Corpoica; a Hernando Delgado, Agronomía de arroz y maíz, de Corpoica; a Edgar Almanza, Física de suelos, de Corpoica; a Richard Thomas, Fijación y reciclaje de nitrógeno, del CIAT; a Georges Rippstein, Manejo de sabana nativa y dinámica de malezas, del Centro de Cooperación Internacional en Investigación Agrícola para el Desarrollo (Cirad); a José Ignacio Sanz, Labranza de suelo, del CIAT; a Patrick Lavelle, Fauna de suelo, del Instituto de Investigación para el Desarrollo (IRD; *anteriormente*, la Oficina de la Investigación Científica y Técnica de Ultramar, ORSTOM); y a Ana Moreno, Fauna de suelos, de la Universidad Complutense de Madrid.

Fase II

Se evaluó el efecto residual del establecimiento de sistemas agropastoriles durante la Fase I, mediante sistemas de labranza de conservación que incluyeron labranza cero y labranza mínima en sistemas de arroz y maíz en rotación con soya.

Los resultados finales de las evaluaciones realizadas durante la Fase I mostraron que algunos sistemas de producción mejoraron las condiciones del suelo, mostrando así su capacidad para el establecimiento de sistemas de producción mediante siembra directa.

Al comienzo de esta Fase se hizo una caracterización integral del suelo que incluyó determinaciones físicas, químicas y biológicas para determinar sus potencialidades y limitaciones. Se evaluaron el rendimiento de cultivos, la composición botánica en las pasturas y las áreas de producción de cultivos.

Objetivos

General

Evaluar el efecto del establecimiento de sistemas agropastoriles en la Fase I en sistemas en rotación manejados con labranza de conservación establecidos en la Fase II.

Específicos

- Evaluar sistemas alternativos de labranza (labranza cero y labranza mínima) en rendimiento y caracterización físico-química del suelo en los cultivos de arroz y maíz en rotación con soya.
- Aplicar las estrategias para el establecimiento y mantenimiento de la capa arable en suelos ácidos de sabana de baja fertilidad para asegurar su sostenibilidad.
- Identificar y cuantificar los procesos biofísicos de los suelos, que interactúan y contribuyen a la estabilización de los sistemas de producción agropecuarios.
- Mejorar las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo con la utilización de los residuos de cosecha, mediante su incorporación y/o cobertura vegetal.
- Desarrollar herramientas como soporte a la investigación y transferencia de tecnología (SIG) para la toma de decisiones adecuada sobre sistemas de producción.

Hipótesis

El establecimiento de sistemas agropastoriles en la Fase I modificó positivamente la condición del suelo (en algunos sistemas), de manera que permitirá su manejo bajo siembra directa.

Metodología

La Fase II se realizó utilizando las áreas de los sistemas de producción establecidos durante la Fase I del ensayo, de manera que pudiera ser evaluado su efecto residual. Los sistemas de

producción basados en los cultivos de arroz y maíz establecidos en la Fase I fueron divididos para establecer los tratamientos de labranza.

Los bloques de la Fase I se fraccionaron quedando 110 m con los tratamientos originales como testigo y en los otros 90 m se introdujeron los sistemas de maíz y arroz en rotación con soya y la leguminosa arbustiva (*Cratylia argentea*) en parcelas de 18 m x 15 m. Las Figuras 2 y 3 muestran la distribución de los tratamientos en campo, para los sistemas basados en los cultivos de arroz y maíz, respectivamente, en las Fases I (1A) y II (1B).

Tratamientos y diseño experimental

Los Cuadros 3 y 4 presentan la descripción de los tratamientos. Los tratamientos se distribuyeron en un diseño de parcelas divididas, con cuatro repeticiones. En los sistemas de producción basados en los cultivos de arroz y/o maíz fueron asignados dos tipos de labranza: labranza cero (siembra directa) y labranza mínima (dos pases de cincel), los cuales correspondieron a las parcelas principales y las subparcelas a los sistemas de producción establecidos durante la Fase I.

Mediciones y observaciones

Se realizaron mediciones y observaciones secuenciales para continuar con el monitoreo de las propiedades físico-químicas y biológicas de suelo y el impacto de las propiedades cambiantes de suelo en los sistemas de producción que incluyeron (densidad aparente, distribución de la porosidad, tasa de infiltración, estabilidad de agregados, resistencia tangencial al corte, conductividad hidráulica y curvas de retención de humedad, entre otras. Al igual que en la Fase I, se realizaron determinaciones y observaciones en los cultivos de arroz y maíz y de soya, para rendimiento, biomasa de raíces, incidencia de plagas, enfermedades y malezas. Se registraron variables climáticas (precipitación, temperatura, radiación solar y humedad relativa). Se evaluaron los procesos de fraccionamiento de materia orgánica y almacenamiento de carbono.

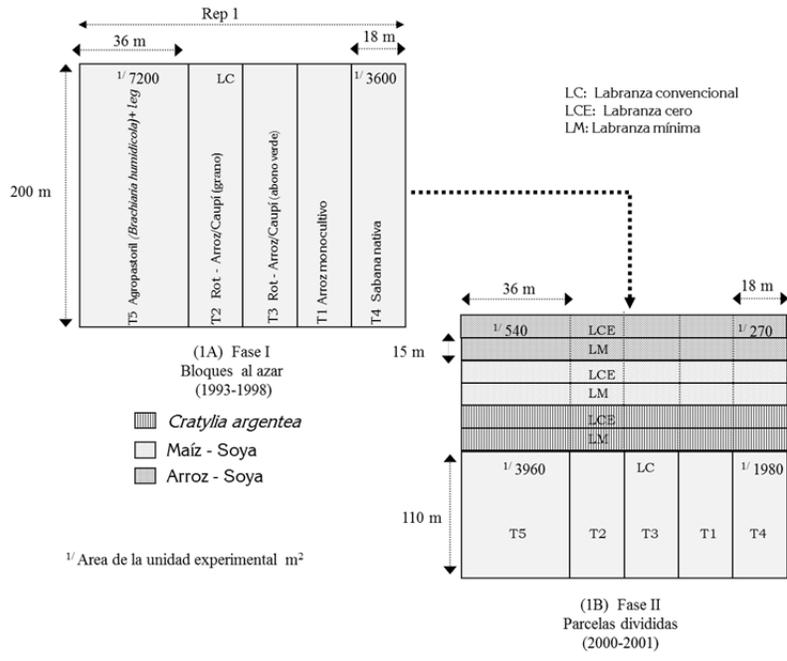


Figura 2. Distribución de los tratamientos en campo, basados en arroz. Fase II, Ensayo Culticore, CNI, Carimagua, Llanos Orientales de Colombia.

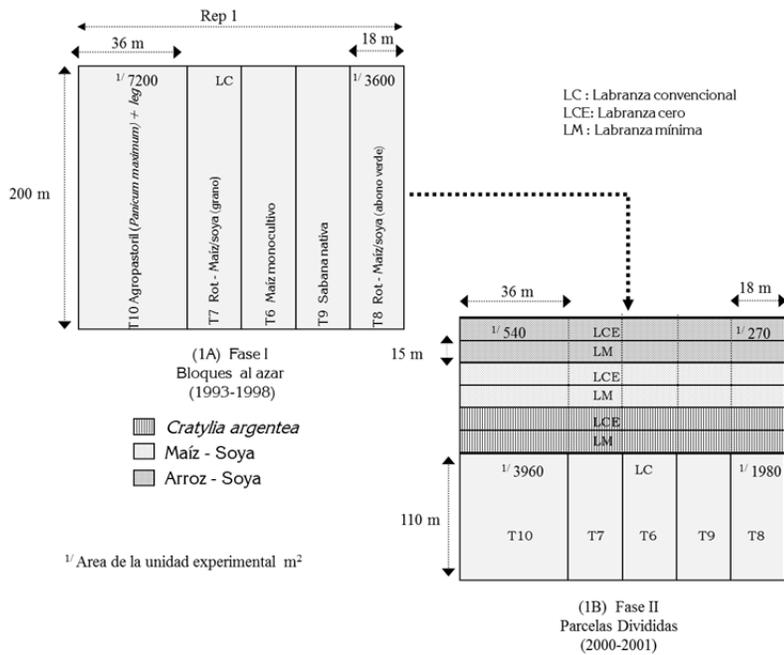


Figura 3. Distribución de los tratamientos en campo, basados en maíz. Fase II, Ensayo Culticore, CNI, Carimagua, Llanos Orientales de Colombia.

Cuadro 3. Descripción de los tratamientos. Segundo ciclo, arroz en rotación con soya.

Tratamiento No.	Labranza	Sistemas de producción Fase I	Sistemas de producción Fase II
1	Cero (Siembra directa)	Arroz monocultivo	Arroz-soya
2		Rotación arroz-caupí (producción de grano)	Arroz-soya
3		Rotación arroz-caupí (abono verde)	Arroz-soya
4		Sabana nativa	Arroz-soya
5		Arroz/pastura	Arroz-soya
1	Mínima (Cinzel)	Arroz monocultivo	Arroz-soya
2		Rotación arroz-caupí (producción de grano)	Arroz-soya
3		Rotación arroz-caupí (abono verde)	Arroz-soya
4		Sabana nativa	Arroz-soya
5		Arroz/pastura	Arroz-soya
6	Cero (Siembra directa)	Maíz monocultivo	Arroz-soya
7		Rotación maíz-caupí (producción de grano)	Arroz-soya
8		Rotación maíz-caupí (abono verde)	Arroz-soya
9		Sabana nativa	Arroz-soya
10		Maíz/pastura	Arroz-soya
6	Mínima (Cinzel)	Maíz monocultivo	Arroz-soya
7		Rotación maíz-caupí (producción de grano)	Arroz-soya
8		Rotación maíz-caupí (abono verde)	Arroz-soya
9		Sabana nativa	Arroz-soya
10		Maíz/pastura	Arroz-soya

Cuadro 4. Descripción de los tratamientos. Segundo ciclo, maíz en rotación con soya.

Tratamiento No.	Labranza	Sistemas de producción Fase I	Sistemas de producción Fase II
1	Cero (Siembra directa)	Arroz monocultivo	Maíz-soya
2		Rotación arroz-caupí (producción de grano)	Maíz-soya
3		Rotación arroz-caupí (abono verde)	Maíz-soya
4		Sabana nativa	Maíz-soya
5		Arroz/pastura	Maíz-soya
1	Mínima (Cinzel)	Arroz monocultivo	Maíz-soya
2		Rotación arroz-caupí (producción de grano)	Maíz-soya
3		Rotación arroz-caupí (abono verde)	Maíz-soya
4		Sabana nativa	Maíz-soya
5		Arroz/pastura	Maíz-soya
6	Cero (Siembra directa)	Maíz monocultivo	Maíz-soya
7		Rotación maíz-caupí (producción de grano)	Maíz-soya
8		Rotación maíz-caupí (abono verde)	Maíz-soya
9		Sabana nativa	Maíz-soya
10		Maíz/pastura	Maíz-soya
6	Mínima (Cinzel)	Maíz monocultivo	Maíz-soya
7		Rotación maíz-caupí (producción de grano)	Maíz-soya
8		Rotación maíz-caupí (abono verde)	Maíz-soya
9		Sabana nativa	Maíz-soya
10		Maíz/pastura	Maíz-soya

PARTE II

Sistemas Agropastoriles

CAPÍTULO 5

Caracterización Biofísica de Sistemas en Monocultivo y en Rotación en Oxisoles de los Llanos Orientales de Colombia

M. Rivera¹ y E. Amézquita²

Resumen

En el Ensayo Culticore, establecido en el Centro Nacional de Investigación (CNI) en Carimagua, Llanos Orientales de Colombia, se analizaron los cambios ocurridos durante el período 1993–1997 en las condiciones físicas y químicas de los suelos, los rendimientos de los cultivos de arroz y maíz monocultivo y en rotación con caupí (*Vigna unguiculata*) y soya (*Glycine max* L.), respectivamente, y la cantidad de N extraído por los cultivos e incorporado por los residuos y como abonos verdes. Los resultados mostraron que: (1) en los sistemas en rotación con leguminosas se obtuvieron los mayores rendimientos de grano y se presentó mayor extracción de N; en estas rotaciones, los incrementos en producción fueron 31% para arroz y 10% para maíz vs. los sistemas en monocultivo; (2) la producción de abono verde y el aporte de N de caupí fueron, respectivamente, 17 y 32% mayor que en soya; (3) las altas producciones de grano en los sistemas en rotación con leguminosas, particularmente maíz-soya, estuvieron asociadas con mayores valores de conductividad hidráulica, permeabilidad al aire, porosidad total, contenido de humedad y bajos valores de densidad aparente en el suelo, en comparación con las mismas características en suelos con sistemas en monocultivo y en sabana nativa. Los mayores valores de P disponible entre 0 y 20 cm de profundidad en el suelo se encontraron en el sistema arroz en rotación con caupí, seguidos por el sistema maíz en rotación con soya entre 20 y 40 cm. Los menores valores se presentaron en sabana nativa.

Palabras claves: suelos ácidos, sistemas en rotación, propiedades físico-químicas de suelo

Introducción

Los Llanos Orientales de Colombia comprenden aproximadamente 26 millones de hectáreas, de las cuales 53% pertenece a la Orinoquia bien drenada, que incluye las terrazas aluviales y la altillanura plana y disectada. De esta área, alrededor de 4.6 millones de hectáreas

1. Física de suelos/Agronomía, Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), Cali, Colombia. m.rivera@cgiar.org
2. Física de suelos, Consultor Internacional. eamezquitac@gmail.com

corresponden a la altillanura plana, con alto potencial agrícola y pecuario; no obstante, actualmente se encuentran subutilizadas en sistemas de ganadería extensiva con pasturas nativas de baja calidad nutritiva.

La producción en estos ecosistemas es limitada por factores agroecológicos, como baja fertilidad de los suelos debido a deficiencias de P, Ca, Mg, K y S; elevada acidez; alta saturación de Al y fragilidad estructural. No obstante, estos suelos ácidos tienen importantes características que favorecen sistemas de agricultura sostenible; entre ellas, abundante y adecuada distribución de lluvias entre abril y noviembre, topografía relativamente plana y características físicas factibles a adecuación mediante manejo. El manejo de estos suelos requiere tecnologías altamente eficientes y de bajo costo. Los componentes tecnológicos necesarios para el desarrollo de esta región deben incluir especies y cultivares que toleren altas concentraciones de Al y sean eficientes en la absorción de nutrientes. Entre las prácticas de manejo actualmente en investigación en este ecosistema se encuentran los sistemas en rotación de cultivos de gramíneas anuales con leguminosas de grano, el establecimiento de pasturas mejoradas de gramíneas asociadas con leguminosas forrajeras, o cultivos de cobertura para minimizar las pérdidas de suelo por erosión y evitar la compactación (Amézquita et al., 2002).

La explotación agrícola continua del suelo sin prácticas de manejo adecuadas para el mantenimiento o restauración de la fertilidad, se convierte en la principal causante de su degradación y en una amenaza para la producción sostenible de alimentos. Se estima que alrededor del 45% de los suelos tropicales presentan baja fertilidad natural (Nair, 1993; Giller, 2001). La rotación de cultivos, sistemas alternativos a los sistemas en monocultivo, los cuales además de suministrar N permiten disminuir la volatilización de N proveniente de los fertilizantes mejorando la eficiencia en su uso (Kanwar et al., 1997), así como capturar el C atmosférico y reducir la oxidación de la materia orgánica mitigando las emisiones de gases efecto invernadero, a la vez que contribuyen al mejoramiento del reciclaje favorecido por la acción de los microorganismos del suelo. La condición limitante para la producción del N como elemento (Sánchez y Logan, 1992) es manejada principalmente mediante la aplicación de fertilizantes nitrogenados de síntesis industrial (Rockström et al., 2009). Sin embargo, la aplicación de fertilizantes nitrogenados al suelo tiene pérdidas implícitas a su naturaleza de aproximadamente el 60%, las cuales ocurren por procesos de lixiviación, volatilización, escorrentía y eutrofización que contaminan el aire, el agua y el suelo. Estas alternativas agronómicas, que incluyen el uso de abonos verdes, aportan cantidades considerables de biomasa, la cual se descompone paulatinamente y deja a disposición de los cultivos nutrientes como N, P (Bajjukya et al., 2006), y K, Ca y Mg (Gallego et al., 2011). Los abonos verdes incorporados al suelo permiten mantener, mejorar, o restaurar las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo (Costa, 2008). Los abonos verdes poseen un tipo de simbiosis leguminosa-rizobios, que permite que el sistema se enriquezca en N a través del tiempo mediante la fijación biológica de N_2 ; y otro tipo de simbiosis leguminosa-hongos, que forma micorriza arbuscular (HMA). Estos tipos de simbiosis se ven manifestados en productividad y sanidad de cultivos (Sánchez de Prager et al., 2010).

El proceso de oxidación biológica de NH_4^+ a NO_3^- está asociado a la presencia de bacterias nitrificantes, las *Nitrosomonas* sp., que son autótrofas presentes en la conversión de NH_4^+ a NO_2^- , y las *Nitrobacter* sp., autótrofas obligadas presentes en la conversión de NO_2^- a NO_3^- (Tisdale y Nelson, 1970).

Los abonos verdes, según el sistema radicular, permiten el rompimiento del suelo, mejorando la estructura y, por consiguiente, la capacidad de infiltración y de retención de humedad (Bunch, 2001). Según el tipo de material utilizado, los mayores picos de liberación de N amoniacal en el suelo se presentan a las 2 semanas de incorporación, mientras que los picos más altos de liberación de N nítrico se presentan a las 4 semanas. La relación C:N debe ser manejada cuidadosamente, dependiendo del tipo de material vegetal usado como abono verde y del tipo de cultivo principal utilizado, sincronizando la liberación con la utilización y reduciendo al mínimo las pérdidas.

El cultivo de maíz requiere grandes cantidades de N. Debido a que este elemento afecta de manera importante los rendimientos, es importante hacer un diagnóstico adecuado de su disponibilidad en el suelo. El maíz necesita aproximadamente de 20 a 25 kg/ha de N por tonelada de grano producido (Sánchez, 1976). La determinación de la cantidad y época de aplicación deben estar orientadas a buscar tanto una mayor cantidad de grano producido por unidad de nutriente aplicado, como un mayor beneficio económico (Mengel y Barber, 1974; Varvel et al., 1997).

Con este tipo de sistemas en rotación y el uso de labranza adecuada e insumos requeridos, se espera incorporar una extensa área del territorio colombiano a la producción nacional sostenible ambientalmente y competitiva económicamente.

Materiales y métodos

Localización

Los estudios se realizaron en el Ensayo Culticore, establecido en 1993 en Oxisoles bien drenados, franco arcillosos limosos (Typic Haplustox Isohipertérmicos caoliníticos) en el Centro Nacional de Investigación (CNI) en Carimagua, Llanos Orientales de Colombia ($4^\circ 37' \text{ N}$ y $71^\circ 19' \text{ O}$), a 175 m.s.n.m., 2240 mm de precipitación y 27° C de temperatura promedio.

Tratamientos y diseño experimental

Los tratamientos seleccionados corresponden a: (1) arroz monocultivo, (3) arroz en rotación con caupí —incorporado como abono verde), (6) maíz monocultivo, (8) maíz en rotación con soya —incorporado como abono verde) y (4) sabana nativa. Se utilizaron las siguientes variedades: Oryzica Sabana 6, de arroz; ICA Cabecita Negra, de caupí; Sikuaní-V1 10, de maíz; variedad Soyica – Altillanura 2, de soya. Las distancias y densidades de siembra fueron: 34 cm

entre surcos y 80 kg/ha, para arroz; 34 cm entre surcos y 80 kg/ha para caupí; 70 cm entre surcos y 25 kg/ha para maíz; 34 cm entre surcos y 50 kg/ha para soya. Los tratamientos se compararon mediante un diseño de bloques al azar con cuatro repeticiones; como testigo se utilizaron parcelas en sabana nativa. El tamaño de las unidades experimentales fue de 180 × 20 m. En este capítulo se presentan los resultados para los sistemas en monocultivo y en rotación con leguminosas usadas como abono verde. Para evaluar el efecto de los tratamientos se determinaron las propiedades físicas y químicas críticas del suelo y su relación con el desempeño de los sistemas de producción.

Fertilización

Los sistemas basados en arroz y maíz recibieron, respectivamente, 500 y 2000 kg/ha de cal dolomítica 30 días antes del establecimiento de los sistemas de producción; asimismo, recibieron aplicaciones de mantenimiento anuales de 200 kg/ha. Como fuente de N se aplicó urea en forma fraccionada en tres partes: 20, 30 y 30 kg/ha en los tratamientos de arroz monocultivo y maíz monocultivo, cada fracción de 40 kg/ha, cada una aplicada 2, 6 y 9 semanas después de la siembra; adicionalmente, en las rotaciones con leguminosas se aplicó una dosis de 20 kg/ha de N al momento de la siembra. Se aplicaron P, K, Mg, S y Zn en niveles adecuados (ver detalles del Ensayo en el Capítulo 4).

Muestreo de suelos, plantas y procedimientos analíticos

Se tomaron muestras de suelo no-disturbadas antes de la siembra de los cultivos y durante 5 años en los diferentes sistemas de producción, incluyendo la sabana nativa. La recolección de las muestras se realizó en cilindros metálicos (50 mm diámetro × 50 mm de altura) en cada tratamiento por repetición a profundidades de 0–10, 10–20 y 20–40 cm, para la realización de las siguientes determinaciones: (1) conductividad hidráulica saturada por el método del permeámetro de cabeza constante; (2) densidad aparente por el método del cilindro de volumen conocido; (3) curvas de retención de humedad equilibrando las muestras a columnas de 0, 25, 50 y 75 cm de succión en la mesa de tensión y a 300, 1000 y 15,000 cm de succión en las ollas de presión; y (4) textura por el método de Bouyucos. Adicionalmente se tomó una muestra compuesta de suelo (10 submuestras) de todas las parcelas a diferentes profundidades. Las muestras se secaron al aire, tamizadas a través de malla de 2 mm. Se utilizó la fracción <2 mm para análisis químico, que incluyó pH en agua relación 1:1, Al intercambiable en KCl 1M, P por Bray II, y Ca determinado en KCl 1M. Además se cuantificó la producción de grano y se determinó el contenido de N en grano y biomasa por el método de Kjeldahl modificado.

Resultados y discusión

Rendimiento de grano, materia seca y abono verde

El Cuadro 1 presenta los resultados de rendimiento de grano, producción de materia seca y abono verde para la extracción de N en cada componente en los sistemas en monocultivo y en rotación desde 1994 hasta 1997.

Producción de grano

La producción promedio de arroz monocultivo fue de 2430 kg/ha, con una extracción promedio de N de 27.5 kg/ha. En el sistema en rotación con caupí incorporado como abono verde, en la época de floración, la producción de arroz fue de 3550 kg/ha y la extracción de N fue de 41.5 kg/ha. Lo anterior significa que la rotación con caupí aumentó 45%, en promedio, la producción de arroz. La producción de maíz monocultivo fue de 3200 kg/ha, con una extracción de 50.3 kg/ha de N. En el sistema en rotación con soya, incorporada en floración, la producción de maíz fue de 3470 kg/ha y la extracción de N de 54.2 kg/ha, lo que significa que la rotación con soya incrementó 10%, en promedio, la producción de maíz, resultados acordes con otras investigaciones que han mostrado aumentos en rendimientos de maíz entre el 5 y 30%, comparado con el rendimiento en monocultivo continuo (Copeland et al., 1993; Crookston et al., 1991; Lund et al., 1993; Peterson y Varvel, 1989; Singer y Cox, 1998; West et al., 1996). Uno de los resultados del incremento del rendimiento de los cultivos en sistemas en rotación y el mejoramiento de la eficiencia del uso del N es el retorno neto a los agricultores, comparado con sistemas en monocultivo, que se ve representado en la reducción de los requerimientos de N y en una disminución de lixiviación de NO_3^- en profundidad (Bruulsema y Christie, 1987; Kanwar et al., 1997).

Producción de materia seca

Se observaron diferencias altamente significativas para la producción de materia seca y extracción de N entre los sistemas de producción. La producción promedio de materia seca de arroz monocultivo fue de 3220 kg/ha, con una extracción de 22.0 kg/ha de N. En el sistema en rotación, la producción de materia seca fue de 4510 kg/ha y la extracción de N fue de 36.4 kg/ha, lo cual indica que la rotación con caupí incrementó 40% la producción de materia seca de arroz. La producción de materia seca de maíz monocultivo fue de 4030 kg/ha, con una extracción de 31.6 kg/ha de N. En el sistema en rotación, la producción de materia seca fue de 4240 kg/ha y la extracción de N fue de 30.6 kg/ha, lo cual indica que la rotación con soya incrementó levemente (5%) la producción de materia seca de maíz, sin afectar significativamente la extracción de N.

Cuadro 1. Rendimiento promedio de grano y producción de residuos (soca) y extracción de N en los cultivos de arroz y maíz monocultivo y en sistemas en rotación, y producción de abono verde de caupí y soya. Carimagua, Llanos Orientales de Colombia.

Sistema de producción	1994			1995			1996			1997		
	Grano	Soca	Abono verde	Grano	Soca	Abono verde	Grano	Soca	Abono verde	Grano	Soca	Abono verde
(kg/ha)												
Arroz ^a	2130 (202) ^c	3741 (324)	—	1280 (241)	1827 (545)	—	3217 (420)	3314 (603)	—	3087 (703)	4013 (586)	—
Arroz-caupí ^b	3380 (112)	4861 (295)	4600 (1419)	2139 (475)	2154 (647)	2450 (973)	3227 (358)	4010 (1073)	2460 (1006)	5431 (1580)	7028 (1530)	3032 (381)
Maíz ^a	2570 (641)	5648 (488)	—	4411 (262)	3960 (207)	—	3369 (228)	3531 (119)	—	2596 (393)	2985 (442)	—
Maíz-soya ^b	2530 (67)	5862 (399)	1995 (337)	4370 (297)	3879 (310)	3220 (412)	4227 (341)	4069 (172)	1890 (68)	2760 (396)	3174 (461)	3327 (337)
(N kg/ha)												
Arroz	24.9 (2.9)	26.6 (1.3)	—	14.1 (4.0)	11.0 (5.6)	—	35.6 (5.4)	22.5 (4.5)	—	35.5 (7.2)	28.1 (4.6)	—
Arroz-caupí	38.2 (2.1)	37.9 (4.6)	120.5 (37.2)	26.1 (11.0)	17.2 (7.8)	67.4 (28.1)	37.1 (8.5)	32.5 (6.9)	65.4 (18.5)	64.6 (18.6)	58.3 (7.4)	81.6 (14.9)
Maíz	38.8 (2.1)	41.8 (3.0)	—	70.1 (7.5)	20.2 (1.1)	—	51.0 (1.5)	27.2 (3.2)	—	41.5 (5.8)	37.4 (1.7)	—
Maíz-soya	36.7 (2.6)	37.5 (2.2)	42.8 (10.0)	73.0 (7.90)	22.9 (1.8)	60.0 (17.3)	64.6 (1.7)	27.3 (4.1)	48.2 (9.5)	42.5 (6.11)	34.8 (1.8)	74.9 (4.50)

a. El monocultivo (arroz o maíz) sembrado en el primer semestre.

b. La rotación (caupí o soya) sembrada en el segundo semestre e incorporada en floración.

c. El número entre paréntesis debajo de cada valor corresponde al error estándar.

Producción de abono verde

El promedio de producción de abono verde de caupí en rotación con arroz fue de 3130 kg/ha, con un contenido promedio de N de 84 kg/ha, mientras que la producción de abono verde de soja en rotación con maíz fue de 2610 kg/ha con un contenido de N de 57 kg/ha. En la rotación con arroz, la cantidad total de materia seca de caupí, incorporada en la etapa de floración como abono verde, fue de 12,500 kg/ha, equivalente a un suministro de N de 334.9 kg/ha, mientras que en la rotación con maíz la cantidad total de materia seca de soja, incorporada como abono verde fue de 10,500 kg/ha, equivalente a aportes de N de 225.9 kg/ha. En total, la producción de abono verde y el aporte de N de caupí fueron, respectivamente, 17 y 32% mayor que en soja, mostrando mayor adaptabilidad del cultivo de caupí a las condiciones ambientales de la zona de estudio.

Caracterización física del suelo

El Cuadro 2 presenta los resultados de las determinaciones de conductividad hidráulica saturada, densidad aparente, permeabilidad al aire, macroporos y porosidad total al final de la evaluación de los sistemas de producción en 1997.

Los valores de conductividad hidráulica variaron entre 0.18 y 12.55 cm/h. Los mayores valores se encontraron entre 0 y 20 cm de profundidad en el suelo en el sistema de cultivo maíz en rotación con soja; y los más bajos en los sistemas en monocultivo y en sabana nativa.

Los valores de densidad aparente variaron entre 1.11 y 1.42 g/cm³. Los valores más altos se encontraron en sabana nativa entre 0 y 20 cm de profundidad y los más bajos en el sistema maíz en rotación con soja para abono verde ($P < 0.05$).

Los valores de permeabilidad al aire variaron entre 3.8 y 34.0 cm/d, El mayor valor se encontró entre 0 y 10 cm de profundidad en el sistema de maíz en rotación con soja, incorporada como abono verde ($P < 0.05$).

La distribución de los macroporos en el suelo varió entre 10.8 y 22.0%, donde los mayores valores correspondieron a arroz monocultivo y maíz en rotación con soja como abono verde; el menor valor correspondió a maíz monocultivo y sabana nativa ($P < 0.05$).

Los valores de porosidad total variaron entre 46.7 y 60.4%. El mayor valor se encontró entre 10 y 20 cm de profundidad en el suelo en el sistema maíz en rotación con soja, y el menor valor entre 20 y 40 cm en arroz monocultivo.

En general, los sistemas en monocultivo presentaron menor conductividad hidráulica que en sabana nativa, lo que coincide con los mayores valores de densidad aparente. La rotación maíz-soja (abono verde) presentó diferencias altamente significativas en permeabilidad al aire

Cuadro 2. Valores promedio de conductividad hidráulica saturada, densidad aparente, permeabilidad al aire, macroporos y porosidad total en los sistemas en monocultivo, rotación y en sabana nativa de 0 a 40 cm de profundidad. Abril de 2007, Carimagua, Llanos Orientales de Colombia.

Profundidad (cm)	Sistema de producción	Conductividad hidráulica (cm/h)	Densidad aparente (g/cm ³)	Permeabilidad al aire (cm/d)	Macroporos (%)	Porosidad total (%)
0-10	Arroz	2.56	1.20	4.7	22.1	57.8
	Arroz + caupí (abono verde)	4.75	1.22	9.1	14.1	51.7
	Maíz	1.13	1.22	6.4	11.3	55.0
	Maíz + soya (abono verde)	12.55	1.11	34.0	20.7	56.1
	Sabana nativa	3.17	1.26	8.3	13.5	50.6
	DMS _{0.05} ^a	5.14	0.11	14.1	1.8	0.87
10-20	Arroz	1.51	1.27	6.5	13.2	52.1
	Arroz + caupí (abono verde)	2.84	1.23	11.7	19.5	54.8
	Maíz	1.92	1.23	12.3	17.6	54.3
	Maíz + soya (abono verde)	4.28	1.17	6.0	14.7	60.5
	Sabana nativa	0.18	1.37	3.96	10.90	50.7
	DMS _{0.05}	3.51	0.13	14.6	1.28	1.40
20-40	Arroz	0.25	1.40	3.9	10.9	46.8
	Arroz + caupí (abono verde)	0.76	1.29	12.9	12.8	49.5
	Maíz	3.19	1.35	2.9	12.9	48.6
	Maíz + soya (abono verde)	0.48	1.35	5.5	11.9	49.1
	Sabana nativa	0.75	1.42	9.4	12.2	49.3
	DMS _{0.05}	2.96	0.18	11.0	0.31	0.41

a. DMS_{0.05} (Prueba de Duncan).

respecto a los demás tratamientos. Los valores de las características físicas en los sistemas en rotación se encuentran en los niveles deseados de mejoramiento de la condición natural de la sabana nativa (Amézquita et al., 2002).

Se encontró correlación alta y positiva (0.82) entre conductividad hidráulica y permeabilidad al aire, así como correlaciones altas negativas entre densidad aparente y las variables conductividad hidráulica, macroporosidad y porosidad total, con valores de -0.71, -0.70 y -0.85, respectivamente.

Las características físicas del suelo de mejores condiciones para el desarrollo de las raíces se observaron en el sistema maíz en rotación con soya, seguido del sistema arroz en rotación con caupí con mayores valores de conductividad hidráulica, permeabilidad al aire, macroporos y porosidad total y menores valores de densidad aparente. Se debe anotar que, a través del tiempo, los sistemas en monocultivo tienden a presentar algunas características similares a la sabana nativa.

Caracterización química del suelo

La Figura 1 presenta los valores promedio para P disponible, Ca y Al intercambiable durante el período de evaluación de los sistemas de producción, de 1994 a 1997.

El promedio de P disponible en el suelo varió entre 1.0 y 25.1 mg/kg de suelo. Los mayores valores se presentaron entre 0 y 20 cm de profundidad en el sistema arroz en rotación con caupí, seguido del sistema maíz en rotación con soya, entre 20 y 40 cm de profundidad. En los sistemas en monocultivo no se observaron diferencias en el contenido de P.

El Al intercambiable varió entre 1.7 y 2.9 cmol/kg de suelo. Los valores más altos se encontraron entre 0 y 20 cm de profundidad en sabana nativa, y los menores entre 0 y 10 cm en sistemas maíz monocultivo y en rotación con soya.

Los valores de Ca intercambiable variaron entre 0.1 y 1.2 cmol/kg de suelo. El mayor valor se encontró en el sistema maíz monocultivo, seguido de maíz en rotación con soya, entre 0 y 20 cm de profundidad en el suelo; como era de esperar, el menor contenido de Ca intercambiable se observó en sabana nativa.

El $pH_{(H_2O)}$ presentó valores entre 4.0 y 4.4, siendo más alto en sabana nativa hasta 20 cm de profundidad. Los valores más bajos ocurrieron entre 0 y 20 cm de profundidad en el sistema arroz en rotación con caupí, y en maíz monocultivo entre 10 y 40 cm de profundidad. Los mayores valores de P disponible en los sistemas en rotación de cultivos se debieron a la aplicación de este nutriente como fertilizante, tanto en los cultivos como en la leguminosa, mientras que la mayor cantidad de P en el sistema arroz en rotación con caupí se debió, posiblemente, a una menor extracción de P por parte del cultivo.

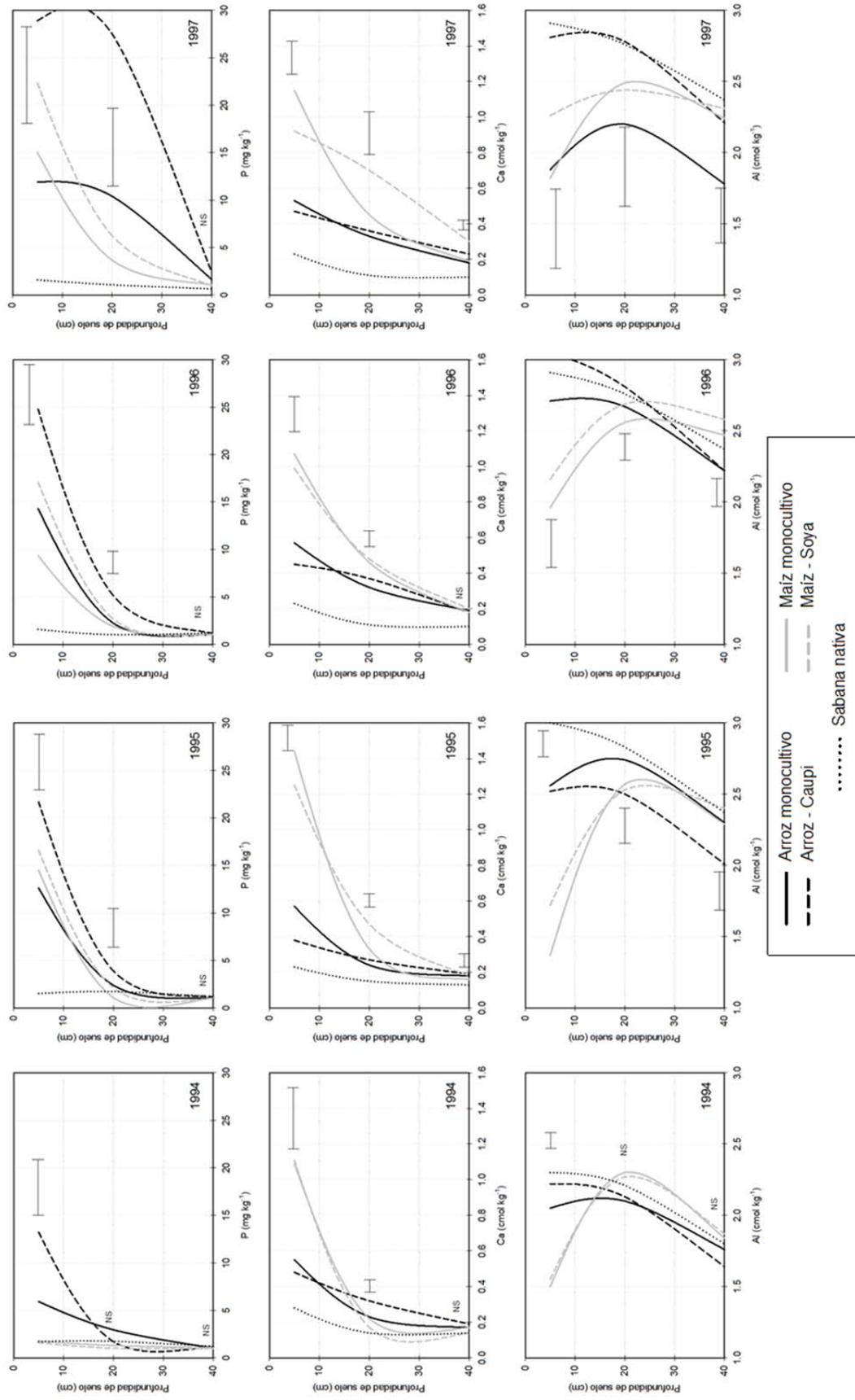


Figura 1. Valores promedio en el suelo de fósforo (P) disponible, calcio (Ca) y aluminio (Al) intercambiable en monocultivos, rotaciones y en sabana nativa, a profundidades de 0–10, 10–20 y 20–40 cm, de 1994 a 1997. Carimagua, Llanos Orientales de Colombia.

Los altos valores de Al intercambiable en la sabana nativa se debieron a que ésta permaneció en condiciones naturales sin aplicación de enmiendas; por el contrario, los menores valores en los sistemas maíz monocultivo y maíz en rotación se debieron a la aplicación de cal para reducir la saturación de Al. Esta aplicación también tuvo un efecto positivo en el Ca intercambiable del suelo. Respecto al pH, podría decirse que la rotación arroz con caupí tiende a acidificar el suelo, principalmente en los primeros horizontes.

Concentración de nitratos en el perfil del suelo

Los valores para concentración de nitratos (kg/ha) observados en los sistemas en monocultivo (arroz y maíz) y en rotación con caupí y soya, incorporados como abono verde y en sabana nativa, se obtuvieron por horizonte y en el perfil de suelo a 80 cm de profundidad antes de la siembra para los años 1994 a 1997 (Cuadro 3).

Los valores de concentración de nitratos en el perfil de suelo a 80 cm de profundidad, antes de la siembra, para cada uno de los ciclos de cultivo presentó diferencias altamente significativas entre sistemas de producción, con valores promedio de 58.0, 140.8, 56.3, 140.1 y 7.1 kg/ha para los sistemas arroz monocultivo, arroz en rotación con caupí (abono verde), maíz monocultivo y maíz en rotación con soya (abono verde) y sabana nativa, respectivamente. Sin embargo no se observaron diferencias entre monocultivos ni entre las rotaciones. En general fue mayor la tendencia a acumular nitratos en profundidad para la rotación maíz-soya, aunque no se presentaron diferencias en el valor promedio total, respecto a la rotación de arroz-caupí.

Interrelaciones entre características físico-químicas del suelo

Se evaluaron las interrelaciones entre las características físicas y químicas del suelo en los sistemas de producción, mediante diferentes técnicas multivariadas que incluyeron análisis de componentes principales, análisis de factores y análisis de agrupamiento.

Análisis de componentes principales

Se utilizó el análisis de componentes principales para describir interrelaciones entre las propiedades físicas (densidad aparente, macroporosidad, porosidad total, permeabilidad al aire y conductividad hidráulica no saturada) y las propiedades químicas (nitratos, amonio, P, pH, Al, Ca, Mg, K, H y de saturación de Al) del suelo en los sistemas de producción. Dada la diversidad en la magnitud de las variables evaluadas, para el análisis de componentes principales se partió de la matriz de correlaciones. A continuación se interpretan las correlaciones con coeficiente de correlación $r \geq 0.65$ y significativas al 1%.

- *Correlaciones entre variables químicas:* La concentración de P (mg/kg) y el contenido de K (cmol/kg) presentaron un coeficiente de correlación de 0.84 debido a las aplicaciones periódicas de fertilizante realizadas en los cultivos del primer semestre; y un coeficiente de correlación de 0.98 entre el contenido de Ca y Mg, debido a la aplicación de cal dolomita, la cual aporta 20% de Ca y 10% de Mg.

Cuadro 3. Valores observados de contenido de nitratos (kg/ha) en los sistemas en monocultivo, rotación y en sabana nativa, de 0 a 80 cm de profundidad, antes de siembra, de 1994 a 1997. Carimagua, Llanos Orientales de Colombia.

Año	Sistema de producción	Profundidad (cm)				
		0-10	10-20	20-40	40-60	60-80
1994	Arroz monocultivo	20.30	14.55	10.42	6.72	7.65
	Arroz-caupí (abono verde)	31.12	41.05	46.22	23.22	18.00
	Maíz monocultivo	7.97	4.92	4.17	10.10	25.07
	Maíz-soya (abono verde)	7.42	4.10	1.85	10.57	16.12
	Sabana nativa	0.82	1.10	3.07	0.00	0.70
	DMS _{0.05} ^a	4.33**	4.32**	6.15**	8.61**	8.27**
1995	Arroz monocultivo	20.27	14.54	10.41	6.71	7.64
	Arroz-caupí (abono verde)	24.92	20.57	25.12	20.85	44.15
	Maíz monocultivo	7.96	4.91	4.16	10.09	25.06
	Maíz-soya (abono verde)	19.55	18.70	22.95	20.90	48.07
	Sabana nativa	0.57	0.67	0.95	1.85	2.00
	DMS _{0.05}	7.10**	4.01**	4.04**	5.72**	11.40**
1996	Arroz monocultivo	20.28	14.53	10.40	6.70	7.63
	Arroz-caupí (abono verde)	32.75	27.60	15.70	13.30	26.95
	Maíz monocultivo	7.95	4.90	4.15	10.08	25.05
	Maíz-soya (abono verde)	20.55	25.32	33.25	32.22	64.40
	Sabana nativa	1.30	0.87	1.95	1.97	2.32
	DMS _{0.05}	5.16**	5.77**	4.50**	6.59**	13.79**
1997	Arroz monocultivo	12.62	7.45	5.40	4.42	23.40
	Arroz-caupí (abono verde)	30.27	25.72	31.85	23.97	39.85
	Maíz monocultivo	12.67	7.67	7.10	6.95	34.40
	Maíz-soya (abono verde)	29.35	31.25	52.55	33.62	67.50
	Sabana nativa	1.29	0.86	1.94	1.96	2.31
	DMS _{0.05}	12.59**	7.31**	9.89**	6.29**	16.57**

a. Diferencias de medias (Prueba de Duncan).

Se encontró una correlación de -0.96 entre el contenido de Ca (cmol/kg) y saturación de Al (%), debido a la neutralización del Al originada por la aplicación de cal dolomita.

- *Correlaciones entre variables físicas:* Se encontró correlación de 0.81 entre la conductividad hidráulica saturada (cm/h) y la permeabilidad al aire (%). Se explica por qué suelos bien aireados presentan mayor continuidad de poros, incrementando la capacidad para el movimiento del agua. También se observó una correlación de -0.71 entre densidad aparente y conductividad hidráulica saturada, lo cual explica por qué suelos con alta densidad aparente presentan menor cantidad de macroporos,

espacio por donde se moviliza el agua. Además se encontró correlación de -0.70 entre macroporosidad y densidad aparente. Se encontraron otras correlaciones significativas al 1%, pero con coeficientes de correlación menores a 0.65.

En el análisis de componentes principales se seleccionaron los primeros cinco, que explican el 79.74% de la variabilidad de los datos, así: el primero explica el 40.18%; este componente tiene que ver con condiciones favorables para el desarrollo de las plantas (valores bajos de saturación de Al, altos contenidos de P y de cationes intercambiables, K, Ca y Mg y alta conductividad hidráulica saturada). El segundo explica el 14.69%; este componente se relaciona con la acidez del suelo (bajos valores de pH y altos contenidos de Al y alta saturación de Al). El tercero explica el 9.97% y está relacionado con restricciones en el movimiento del agua y del aire (baja permeabilidad al aire y baja conductividad hidráulica relacionada con altos contenidos de humedad). El cuarto explica el 8.04% y está relacionado con la concentración de N disponible para las plantas (bajos contenidos de humedad de suelo se relacionan con altos contenidos de nitratos y de amonio). El quinto componente explica el 6.87% y tiene que ver con fijación de P y contenido de K (relaciona altos valores de macroporosidad y permeabilidad al aire con bajos contenidos de P y K).

Análisis de factores

Se realizó un análisis de factores con diferentes variables físicas y químicas para describir la relación entre éstos y los componentes seleccionados; los resultados se muestran en el Cuadro 4. Cada uno de los valores corresponde a la correlación entre las variables originales y cada una de las dimensiones seleccionadas anteriormente, llamadas factores; en la última columna se reporta la varianza compartida de cada una de las variables con las demás variables de estudio. Las variables que más comparten varianza con otras variables son saturación de Al, Mg, Ca y densidad aparente, y las que menos comparten son el contenido de nitratos y el pH.

Análisis de conglomerado

A partir de los cinco componentes principales se realizó un análisis de conglomerados con el fin de caracterizar los tratamientos respecto a las características de suelo. El análisis de conglomerados por el método de Ward separó grupos de la siguiente forma:

- *Grupo 1:* Todos los sistemas de 10 a 20 cm de profundidad y la sabana nativa de 0 a 10 cm, los cuales se caracterizaron por alto contenido de saturación de Al >80% y baja permeabilidad al aire <9%, probablemente por el efecto de la profundidad de labranza del suelo y en sabana por efecto de la compactación natural.
- *Grupo 2:* Todos los tratamientos de 20 a 40 cm de profundidad y la sabana nativa de 10-40 cm, que corresponden a altos valores de saturación de Al y a los contenidos

más bajos de P disponible. Se observa continuidad en la saturación de Al, pero el P disponible disminuye respecto al agrupamiento anterior.

- *Grupo 3:* El tratamiento arroz en rotación con caupí de 0 a 10 cm de profundidad, caracterizado por tener 10% menos de saturación de Al que el agrupamiento anterior y contenidos más altos para concentración de nitratos y P disponible.
- *Grupo 4:* El tratamiento arroz monocultivo de 0 a 10 cm de profundidad, caracterizado por el mayor contenido de humedad volumétrica (%), contenido medio de P y mayor contenido de C (%).

Cuadro 4. Correlaciones entre cada variable y las dimensiones seleccionadas por variable en el análisis de factores. Carimagua, Llanos Orientales de Colombia.

Variable	Factor 1	Factor 2	Factor 3	Factor 4	Factor 5	Comunalidades finales
Humedad grav. (%)	0.04932	-0.01085	0.57483	-0.60913	0.00226	0.7040
Amonio (kg/ha)	0.03497	-0.63100	0.37021	0.42855	0.26205	0.7887
Nitratos (kg/ha)	0.34114	0.42905	0.16662	0.46914	-0.29168	0.6333
P (mg/kg de suelo)	0.70854	0.19732	-0.15414	0.20296	-0.46944	0.8262
pH (H ₂ O)	-0.25777	-0.66172	-0.35323	-0.18771	0.05689	0.6675
Al (cmol/kg de suelo)	-0.16489	0.79952	-0.06520	-0.09024	0.07656	0.6846
Ca (cmol/kg de suelo)	0.87205	-0.40281	0.05155	0.01002	-0.15812	0.9504
Mg (cmol/kg de suelo)	0.82457	-0.46580	0.11148	-0.01586	-0.14850	0.9316
K (cmol/kg de suelo)	0.78357	0.28378	0.03003	0.06002	-0.29538	0.7862
H (cmol/kg de suelo)	0.12546	0.11291	0.69238	0.40506	0.35308	0.7966
C (%)	0.68865	0.06955	0.15114	-0.52541	-0.06841	0.7826
Saturación de Al (%)	-0.87682	0.38089	-0.12451	0.00974	0.18486	0.9636
Humedad vol. (%)	0.73271	0.02649	-0.41394	0.04427	0.35547	0.8372
Densidad aparente (g/cm ³)	-0.91703	-0.15085	-0.01306	0.01889	-0.19036	0.9004
Permeabilidad al aire (%)	0.61898	-0.07488	-0.55193	0.14031	0.28013	0.7915
Macroporos (%)	0.68789	0.33561	-0.07559	-0.04132	0.39013	0.7454
Porosidad total (%)	0.75298	0.18639	0.17756	-0.19754	0.30550	0.7655
Varianza explicada	6.82	2.49	1.69	1.36	1.16	—
% varianza explicada	50.39	18.36	12.47	10.03	8.56	100.00

- *Grupo 5:* El tratamiento maíz en rotación con soya de 0 a 10 cm de profundidad, caracterizado por tener 12% menos de saturación de Al que el agrupamiento anterior, presentó mayor conductividad hidráulica saturada, contenido medio de P disponible, mayor cantidad de macroporos y mayor permeabilidad al aire.
- *Grupo 6:* El tratamiento maíz monocultivo de 0 a 10 cm de profundidad, caracterizado por presentar 10% menos de saturación de Al que el grupo anterior, contenido medio de P disponible, baja conductividad hidráulica y la más baja permeabilidad al aire.
- *Grupo 7:* Los tratamientos maíz monocultivo y maíz en rotación con soya de 10 a 40 cm, caracterizado por alta saturación de Al, alta concentración de nitratos y baja permeabilidad al aire.

De los agrupamientos anteriores podemos concluir que los verdaderos cambios ocurridos en los sistemas de producción se manifestaron con mayor intensidad de 0 a 10 cm de profundidad, excepto en sabana nativa, en la cual se manifestó su condición natural (Figura 2).

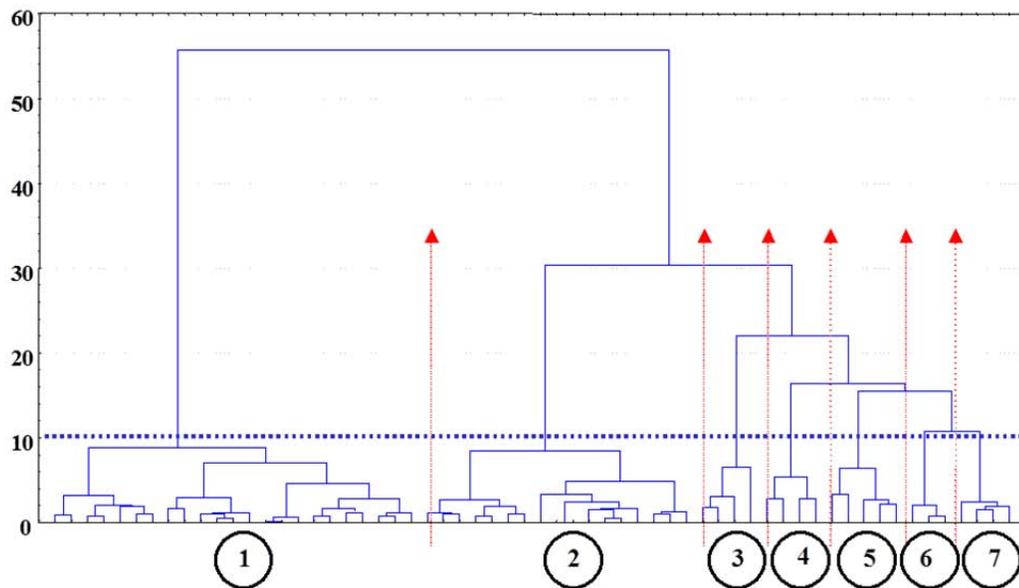


Figura 2. Agrupación por el método de Ward de los sistemas en monocultivo, rotación y en sabana nativa. Carimagua, Llanos Orientales de Colombia, 1997.

Conclusiones

- Los sistemas de producción arroz y maíz en rotación con caupí presentaron la mayor extracción de N y los mayores rendimientos, tanto de grano como de residuos de cultivos (soca). Las rotaciones incrementaron, en promedio, 31% la producción de arroz y 10% la de maíz, en comparación con monocultivos.
- La producción de abono verde de caupí fue 17% mayor que la de abono verde de soya, lo mismo que el aporte de N (32% mayor).
- La producción de grano en los sistemas en rotación, particularmente maíz-soya, está asociada con los mayores valores para conductividad hidráulica, permeabilidad al aire, porosidad total y contenido de humedad del suelo y con bajos valores de densidad aparente, contrario a lo presentado en los sistemas en monocultivo y en sabana nativa.
- Los mayores valores de P disponible se encontraron entre 0 y 20 cm de profundidad en el sistema arroz en rotación con caupí, seguidos por el sistema maíz en rotación con soya entre 20 y 40 cm.
- Los sistemas en monocultivo tienden a degradar el suelo a través del tiempo, manifestándose en condiciones de suelo similares a la sabana nativa, por lo cual el uso más recomendado es el sistema de cultivo-leguminosa en rotación.

Referencias

- Amézquita E; Friesen D; Rivera M; Rao IM; Barrios E; Jiménez JJ; Decaens T; Thomas RJ. 2002. Sustainability of crop rotation and ley pasture systems on the acid-soil savannas of South America. En: Proceedings of the 17th World Congress of Soil Science, Bangkok, Tailandia, 14–21 agosto 2002.
- Baijukya FP; De Rider N; Giller KE. 2006. Nitrogen release from decomposing residues of leguminous cover crops and their effect on maize yield on depleted soils of Bukoba District, Tanzania. *Plant and Soil* 279:77–93.
- Bruulsema TW; Christie BR. 1987. Nitrogen contribution to succeeding corn from alfalfa and red clover. *Agronomy Journal* 79(1):96–100.
- Bunch R. 2001. Keynote: The secret to making soil conservation successful: Short-term benefits. En: Stott DE; Mohtar RH; Steinhardt GC, eds. *Sustaining the global farm. Selected papers from the 10th International Soil Conservation Organization Meeting, May 24–29, 1999, West Lafayette, IN.* International Soil Conservation Organization in cooperation with United States Department of Agriculture, Agricultural Research Service, National Soil Erosion Research Laboratory, and Purdue University, West Lafayette, IN, Estados Unidos. p 516–522.

- Copeland PJ; Allmaras RR; Crookston RK; Nelson WW. 1993. Corn-soybean rotation effects on soil water depletion. *Agronomy Journal* 85(2):203–210.
- Costa FS. 2008. Estoque de carbono orgânico no solo e emissões de dióxido de carbono influenciadas por sistemas de manejo no sul do Brasil. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 32(1):323–332.
- Crookston RK; Kurlle JE; Copeland PJ; Ford JH; Lueschen WE. 1991. Rotational cropping sequence affects yield of corn and soybean. *Agronomy Journal* 83(1):108–113.
- Gallego J; Prager M; Sánchez de Prager M. 2011. Efecto de dos abonos verdes sobre la mineralización del nitrógeno y la dinámica de bacterias oxidantes del amonio y del nitrito en un ciclo productivo de maíz (*Zea mays* L.). *Memorias II Congreso Internacional de Agroecología. VI Congreso Nacional de Agroecología. Universidad del Cauca, Popayán, Colombia.*
- Giller K. 2001. Nitrogen fixation in tropical cropping systems. 2a. ed. CAB International, Wallingford, Reino Unido. 423 p.
- Kanwar RS; Colvin TS; Karlen DL. 1997. Ridge, moldboard, chisel, and no-till effects on tile water quality beneath two cropping systems. *Journal of Production Agriculture* 10(2):227–234.
- Lund MG; Carter PR; Oplinger ES. 1993. Tillage and crop rotation affect corn, soybean, and winter wheat yield. *Journal of Production Agriculture* 6(2):207–213.
- Mengel DB; Barber SA. 1974. Rate of nutrient uptake per unit of corn root under field conditions. *Agronomy Journal* 66:399–402.
- Nair PKR. 1993. An introduction to agroforestry. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Países Bajos. 479 p.
- Peterson TA; Varvel GE. 1989. Crop yield as affected by rotation and nitrogen rate. I. Soybean. *Agronomy Journal* 81:727–731.
- Rockström J; Steffen W; Noone K; Persson A; Chapin FS; Lambin EF; Lenton TM; Scheffer M; Folke C; Schellnhuber HJ; Nykvist B; de Wit CA; Hughes T; van der Leeuw S; Rodhe H; Sörlin S; Snyder PK; Costanza R; Svedin U; Falkenmark M; Karlberg L; Corell RW; Fabry VJ; Hansen J; Walker B; Liverman D; Richardson K; Crutzen P; Foley JA. 2009. A safe operating space for humanity. *Nature* 461:472–475.
- Rodríguez-Moreno N; Toro-Lozano C; Martínez-Salgado M; Mercado-Reyes M. 2007. Estandarización de condiciones para la prueba cuantitativa del NMP con bacterias nitrificantes y denitrificantes usando como matriz compost. *Universitas Scientiarum* 12(2):69–81.
- Sánchez PA. 1976. Properties and management of soils in the tropics. John Wiley & Sons, Nueva York, Estados Unidos. 618 p.

- Sánchez PA; Logan TJ. 1992. Myths and science about the chemistry and fertility of soils in the tropics. En: Lal R; Sánchez PA, eds. Myths and science of soils in the tropics. SSSA Special Publication No. 29. Soil Science Society of America, American Society of Agronomy, Madison, WI, Estados Unidos. p 35–46.
- Sánchez de Prager; Posada A, R; Velásquez P, D; Narváez C, M. 2010. Metodologías básicas para el trabajo con micorriza arbuscular y hongos formadores de micorriza arbuscular. Universidad Nacional de Colombia, Sede Palmira, Colombia. 139 p.
- Singer JW; Cox WJ. 1998. Agronomics of corn production under different crop rotations in New York. *Journal of Production Agriculture* 11:462–468.
- Stanger TF; Lauer JG. 2008. Corn grain yield response to crop rotation and nitrogen over 35 years. *Agronomy Journal* 100(3):643–650.
- Stanger TF; Lauer JG; Chavas J-P. 2008. The profitability and risk of long-term cropping systems featuring different rotations and nitrogen rates. *Agronomy Journal* 100(1):105–113.
- Tisdale SL; Nelson WL. 1970. Soil fertility and fertilizers. McMillan Co. Publishing, Nueva York, Estados Unidos. 760 p.
- Varvel GE; Schpers JS; Francis DD. 1997. Ability for in-season correction of nitrogen deficiency in corn using chlorophyll meters. *Soil Science Society of America Journal* 61(4):1233–1239.
- West TD; Griffith DR; Steinhardt GC; Kladvko EJ; Parsons SD. 1996. Effect of tillage and rotation on agronomic performance of corn and soybean: Twenty-year study on dark silty clay loam soil. *Journal of Production Agriculture* 9(2):241–248.

CAPÍTULO 6

Evaluación del Modelo de Simulación de Crecimiento CERES Aplicado a la Variedad de Maíz (*Zea mays* L.) Sikvani V-110 en Suelos Ácidos de Sabanas

M. Rivera¹ y E. Amézquita²

Resumen

El modelo CERES-Maize (*Crop Environment Resource Synthesis*, en inglés) es un modelo de tipo predictivo determinístico, diseñado para simular el crecimiento del cultivo de maíz bajo diferentes condiciones de suelo, clima y manejo. Con el fin de validar a nivel del trópico el modelo CERES-Maize de DSSAT v3.5, en la simulación de crecimiento y producción de maíz (*Zea mays* L.), variedad Sikvani V-110, se realizaron evaluaciones periódicas durante los años 2004 a 2007, en el Ensayo Culticore, en sistemas en monocultivo y en rotación con soya. El experimento de campo se realizó en el Centro Nacional de Investigación (CNI) en Carimagua, Llanos Orientales de Colombia (4° 37' N y 71° 19' O), a 175 m.s.n.m., con una temperatura promedio de 27 °C y precipitación anual promedio de 2240 mm, en Oxisoles bien drenados franco arcillosos (Typic Haplustox Isohipertérmicos caoliníticos).

Inicialmente se ajustaron los seis coeficientes genéticos de la variedad, que fueron calibrados con base en resultados de experimentación en campo en Carimagua. Una vez establecidos los archivos de entrada, el modelo fue ejecutado. Los resultados generados por el modelo presentaron una estrecha relación (0.95) entre los datos observados en campo y los parámetros evaluados, lo cual indica que el modelo predijo acertadamente la producción de grano, biomasa y componentes de rendimiento, así como los parámetros fenológicos, días a floración y a madurez fisiológica de la variedad Sikvani V-110.

Palabras claves: simulación de crecimiento de cultivos, trópico, monocultivos, rotaciones, modelo CERES-Maize

Introducción

El Sistema de Soporte para la Toma de Decisiones en la Transferencia de Agrotecnología (DSSAT, sus siglas en inglés) ha sido usado por los investigadores en los últimos 15 años a

1. Física de suelos/Agronomía, Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), Cali, Colombia. m.rivera@cgiar.org
2. Física de suelos, Consultor Internacional. eamezquitac@gmail.com

nivel mundial. Este paquete incorpora modelos de diferentes cultivos a un software, facilitando la evaluación y aplicación para diferentes propósitos. La estructura de modelos de simulación incluye los módulos CERES, CROPGRO y CROPSIM (Hernández et al., 2009). El desarrollo inicial fue motivado por la necesidad de integrar el conocimiento sobre suelo, clima, cultivos y manejo, para tomar mejores decisiones relacionadas con la transferencia de tecnologías de producción de una localidad a otra, cuyas condiciones climáticas y de suelos fueran diferentes.

El modelo CERES-Maize (*Crop Environment Resource Synthesis*, en inglés) es de tipo predictivo determinístico, diseñado para simular el crecimiento del cultivo de maíz bajo diferentes condiciones de suelo, clima y manejo. Simula el desarrollo y crecimiento del cultivo y los balances de agua y N. El submodelo de desarrollo y crecimiento tiene en cuenta los cambios diarios de materia seca (tallos, espigas y grano) y área foliar, el número de hojas, la longitud de raíces por unidad de volumen de suelo y profundización radicular. El submodelo para el balance hídrico incluye la transpiración de las plantas, la evaporación directa del suelo, la evapotranspiración potencial, el drenaje, la escorrentía, el contenido de humedad del suelo y los índices de estrés hídrico. Finalmente, el submodelo para balance de N tiene en cuenta la cantidad de N proveniente de nitratos y amonio en el suelo, la cantidad de N en el grano y los componentes de la biomasa de la planta y las pérdidas de N asociadas con la lixiviación, denitrificación y volatilización, más un índice de estrés para el N (Hunt y Boote, 1998).

El modelo de simulación CERES-Maize (Jones y Kiniry, 1986) es un modelo de predicción basado en cálculos de tiempo térmico para un rango de valores de temperatura entre temperatura base (T_b) y temperatura óptima (T_o). Dentro de este rango, el tiempo térmico representa el inverso de la pendiente de la relación entre la tasa de desarrollo (en días) y la temperatura (Monteith, 1984), tiene unidades de $^{\circ}\text{C}/\text{d}$ (TTd) y es usualmente calculada con base en valores diarios acumulados de la diferencia entre temperatura ambiente T_x y T_b . La tasa de desarrollo representa la relación entre desarrollo del cultivo (ej., consecución de un estado dado) y el tiempo requerido para alcanzar dicho estado (Trudgill et al., 2005). Éste es máximo a T_o , y tiende a cero cuando la temperatura ambiente se aproxima a la temperatura base o a la temperatura mínima (T_m), donde son conocidas como temperaturas cardinales: ($T_m > T_o > T_b$) y sus valores varían entre especies, genotipos, procesos de crecimiento y estados de desarrollo (Ritchie y NeSmith, 1991; Ellis et al., 1992; Porter y Gawith, 1999).

El modelo de simulación CERES-Maize, validado en este trabajo, fue desarrollado por un grupo de investigación multidisciplinario en la Universidad de Florida. Es considerado como una herramienta de apoyo en el manejo y en la toma de decisiones sobre estrategias de riego, control de plagas y enfermedades de este cultivo (Godwin y Jones 1991). Es utilizado en investigación básica y aplicada en los efectos de clima (régimen térmico, estrés de humedad) y manejo (prácticas de fertilización, riego), en el crecimiento y producción de maíz. También es usado para evaluar la eficiencia de la fertilización nitrogenada, tanto la extracción como la lixiviación de N en el suelo, y en investigación en el cambio climático global para evaluar los efectos potenciales del calentamiento debido al incremento de CO_2 y los cambios en precipitación y uso eficiente del agua. En el modelo, la producción potencial de materia seca es

calculada como una función de la radiación, el índice de área foliar y factores de reducción por temperatura y estrés de humedad. Los estados fenológicos son simulados principalmente con base en grados-día (°C/d). La tasa de crecimiento de hojas y de tallos se calcula dependiendo de los estados fenológicos. Para el balance de agua se utilizan rutinas separadas, incluyendo escorrentía, infiltración, flujo de agua en saturación y no-saturación y drenaje. También se calculan las dinámicas de N mineral y N disponible para el cultivo. Los datos utilizados como entradas incluyen variables climáticas y de manejo, coeficientes genéticos para el cultivo y parámetros de suelo. El modelo provee información de materia seca y contenido de N en raíces, parte aérea y grano, balance de agua y N mineral en el suelo. La estructura matemática del modelo está constituida por ecuaciones diferenciales y escrito en Fortran IV, que permite intervalos de tiempo de un día (Godwin y Jones, 1991) en una serie de rutinas para la simulación de procesos y eventos manejados por la subrutina CROP (Bowen y Baethgen, 1998). El componente N de los modelos no está diseñado para operar independientemente, sino como parte de los modelos CERES. Estos modelos pueden correrse con un conjunto de opciones para simular la condición en la cual el N no es limitante (Godwin y Jones, 1991).

El modelo CERES-Crop describe la evapotranspiración, el balance de agua en el suelo y la forma en que la temperatura y el fotoperíodo influyen en el desarrollo del cultivo y en el crecimiento vegetativo de las raíces y del grano. Los componentes de N en el modelo son: mineralización y/o inmovilización asociada con la descomposición de los residuos, nitrificación, denitrificación, hidrólisis de urea, lixiviación de nitratos, extracción y uso de N por cultivos (Jones et al., 1998).

El modelo para operar utiliza un set de datos mínimos de entrada, los cuales han sido agrupados en tres componentes: (1) observaciones climáticas diarias (temperatura máxima y mínima, precipitación y radiación solar), (2) información de sitio (latitud, longitud, altitud, propiedades físicas, químicas y morfológicas de suelo) y (3) información de manejo de cultivos (labranza, densidad de siembra, sistemas de siembra, profundidad, aplicación de fertilizantes). Además utiliza un set de coeficientes genéticos que describe los cultivares en términos de desarrollo (biomasa y grano), requeridos para correr el modelo (Jones, 1993; Jones et al., 2003)

La evaluación del modelo CERES-Maize para la variedad de maíz (*Zea mays* L.) Sikuaní V-110 bajo DSSAT v 3.5 en Oxisoles de los Llanos Orientales de Colombia, permite ajustar la información generada a través de los hallazgos de la investigación en países de la zona templada. Su comprensión cuantitativa es importante para la planeación y el desarrollo de actividades de investigación y de transferencia de tecnología. La utilización apropiada del modelo puede, eventualmente, reducir los costos y el número de ensayos y permite, además, efectuar selección de materiales más adaptados. Asimismo, es útil para el estudio de áreas que carecen de información y en la generación de hipótesis como base para el diseño de nuevos ensayos a nivel de campo. Debido a la importancia del cultivo de maíz en Colombia, el presente estudio tuvo como objetivo evaluar el modelo de simulación de crecimiento CERES-Maize bajo DSSAT v3.5 utilizando las variables de crecimiento, desarrollo y producción de la variedad de

maíz Sikuaní V-110 tolerante a suelos ácidos en Oxisoles de los Llanos Orientales de Colombia, así como verificar su validez, utilizando datos experimentales obtenidos en el Ensayo Culticore en diferentes épocas y bajo las mismas condiciones ambientales.

Materiales y métodos

Datos experimentales

Los datos experimentales se obtuvieron del Ensayo Culticore, establecido en el Centro Nacional de Investigación (CNI) en Carimagua, Llanos Orientales de Colombia, correspondientes a los ciclos de cultivo de los años 1994 a 1997, en los sistemas de producción maíz monocultivo y maíz en rotación con soya incorporada como abono verde. Las fechas de siembra para el cultivo de maíz, tanto en monocultivo como en rotación con soya, fueron el 14, 25 y 28 de abril para 1994, 1995 y 1997, respectivamente; en 1996 fue el 2 de mayo. Las fechas de cosecha fueron el 10, 24, 21 de agosto para 1994, 1995 y 1996, respectivamente; y el 27 de septiembre para 1997.

Componentes de crecimiento

Los parámetros altura de planta y número de hojas por planta se registraron periódicamente a partir de 30 días después de la siembra hasta la madurez fisiológica. La acumulación de materia seca se determinó en los diferentes estados de crecimiento (separada por los componentes hojas, tallos y grano).

Componentes de rendimiento

Peso de grano, número de granos por mazorca, número de granos por metro cuadrado; se generó adicionalmente el índice de cosecha mediante los datos de rendimiento de grano y producción de materia seca total.

Determinaciones fenológicas

Se registraron los días correspondientes a 50% de floración y 50% de aparición de estigmas, y días transcurridos hasta la madurez fisiológica.

Determinaciones químicas

Se determinaron la concentración de N en grano y la biomasa en plantas muestreadas en la madurez fisiológica.

Evaluación del modelo de simulación DSSAT v 3.5 CERES-Maize

Se utilizó el modelo CERES-Maize para simular cómo el crecimiento y rendimiento del cultivo de maíz era influenciado por el genotipo, fechas de siembra, suministro de N (fertilización mineral y fertilización orgánica), densidad de plantas y suministro de agua (precipitación), del

Ensayo Culticore para los sistemas en monocultivo y en rotación con soya de los ciclos de cultivo en los años 1994 a 1997.

Datos de entrada

Para ejecutar la simulación del modelo CERES-Maize se requirió un grupo de datos mínimos de entrada sobre el manejo de los cultivos, parámetros micro y macroambientales asociados con el clima, suelo y datos específicos sobre el cultivo. Los archivos de los datos de entrada del modelo CERES-Maize fueron estandarizados por el Proyecto IBSNAT como formatos de entradas/salidas; su estructura está descrita en DSSAT v 3 (IBSNAT, 1989).

Información climática

Diariamente se registraron datos climáticos para los parámetros de temperatura máxima y mínima (°C), precipitación (mm) y radiación solar (MJ/m² por día), y se incluyeron en archivos climáticos para cada uno de los años de evaluación. La información se almacenó en archivos tipo CCCA.WHT.

Información de suelo

Se recolectaron muestras de la superficie del suelo y se analizaron para determinar las características químicas (pH, CO, N, CIC) y físicas (DA, textura). La evaporación superficial potencial del suelo, el número de la curva de escorrentía y el albedo se determinaron de acuerdo con Jones y Kiniry (1986) y la tasa de drenaje según los autores (Suleiman y Ritchie, 2001). Las propiedades físicas denominadas, el límite menor de contenido de agua en el suelo, LL (punto de marchitez), el límite superior de contenido de agua de drenaje, DUL (capacidad de campo) y el contenido de humedad a saturación se determinaron en el Laboratorio de Física de suelos del Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), en Palmira.

Coefficientes genéticos

Para simular la variedad de maíz Sikuaní V-110 mediante el modelo CERES-Maize, fue necesario generar inicialmente los siguientes coeficientes genéticos para dicha variedad:

- *P1*: Corresponde al tiempo térmico (°C/d) desde la emergencia hasta el final de la fase juvenil (utilizando 8 °C como temperatura base, en la cual las plantas no responden a cambios del fotoperíodo).
- *P2*: Período de tiempo, expresado en días (d), en el que el desarrollo es retrasado por cada hora de incremento del fotoperíodo, el cual precede a la máxima tasa de desarrollo, la cual es considerada (12.5 h).
- *P5*: Tiempo térmico (°C/d) desde la floración femenina hasta la madurez fisiológica (usando 8 °C como temperatura base).

- *G2*: Número máximo de granos por planta (no./planta).
- *G3*: Tasa de llenado de grano durante el estado de llenado de grano, bajo condiciones óptimas (mg/d).
- *PHINT*: Intervalo de tiempo (grados días) entre sucesivas apariciones de primordios foliares).

Archivos de datos experimentales

Los datos del experimento incluyeron información de sitio (latitud, longitud, altitud, propiedades físicas, químicas y morfológicas de suelo), información del manejo de los cultivos (labranza, fechas de siembra, densidad de siembra, sistema de siembra, profundidad, fecha, tipo forma de aplicación y cantidad de fertilizantes). Estos datos se almacenaron dentro de archivos denominados, archivo (X), para cada uno de los ciclos de cultivo evaluados.

Ejecución de la simulación

Una vez creados los archivos de clima, suelo y manejo de los cultivos, y actualizados los datos de coeficientes genéticos, con la información obtenida se corrió el modelo CERES-Maize para cada uno de los años evaluados y se generaron los archivos de salida. Los resultados de los archivos de salida se compararon con los datos observados en campo.

Ajuste de la simulación

Se evaluaron los datos obtenidos mediante un análisis de correlación simple (r) para determinar el grado de ajuste (aunque existen pruebas como el cuadrado medio del error [RMSE.]) para estimar la variación entre los valores medidos y los simulados, que se pueden expresar en las mismas unidades como los datos (Loague y Green, 1991).

Resultados y discusión

Coefficientes genéticos

Para la evaluación del modelo CERES-Maize se generaron coeficientes genéticos a partir de resultados obtenidos en el Ensayo Culticore, para la variedad Sikuaní V-110 en los Llanos Orientales de Colombia, en estudios específicos de tolerancia a suelos ácidos de la región (Daroub et al., 2000) (Cuadro 1). Los coeficientes genéticos para la variedad Sikuaní V-110, usados para las simulaciones, se estimaron usando fechas de floración femenina, fechas de madurez, rendimiento de grano, biomasa a madurez, número de granos por metro cuadrado, número de granos por mazorca y peso de grano. Los coeficientes genéticos fueron calculados mediante GenCalc v-3, como lo indica el procedimiento presentado por Tsuji et al. (1994), hasta obtener valores calculados similares a los observados.

Cuadro 1. Valores obtenidos en la calibración de los coeficientes genéticos del cultivo de la variedad de maíz Sikuaní V-110. Carimagua, Llanos Orientales de Colombia.

Variedad	Coefficientes genéticos	Valor	Descripción
Maíz Sikuaní V-110	P1	320	Tiempo térmico (°C/d) desde la emergencia hasta el final de la fase juvenil.
	P2	3.0	Tiempo (d) en el cual el desarrollo es retrasado por cada hora de incremento del fotoperíodo.
	P5	750	Tiempo térmico (°C/d) desde la floración femenina hasta la madurez fisiológica.
	G2	500	Máximo número de granos por planta.
	G3	7.7	Tasa de llenado de grano en condiciones óptimas (mg/d).

FUENTE: CIAT (2000).

Estados fenológicos

Las plantas de maíz evaluadas en los sistemas de producción en monocultivo y en rotación con soya en los estados fenológicos correspondientes a la floración y a la madurez fisiológica, presentaron pocas diferencias. La diferencia observada en la simulación correspondió a un incremento en días (5) para alcanzar la madurez fisiológica del maíz evaluado en la rotación (Figura 1A).

Producción de grano y de biomasa

La producción promedio de grano no presentó diferencias entre los sistemas en monocultivo y en rotación con soya. La menor producción se observó tanto en monocultivo como en la rotación en el ciclo evaluado en 1994 y los mayores rendimientos en 1995. El modelo simuló valores promedio en todos los años evaluados, subestimando en 32% los rendimientos en 1995. Al igual que el rendimiento de grano, el de biomasa total no presentó diferencias significativas entre sistemas en monocultivo y en rotación.

En el Cuadro 2 se incluyen los resultados entre 1994 y 1997 para componentes del cultivo y desarrollo fenológico, tanto de los datos observados como de los simulados por el modelo CERES-Maize en el sistema maíz monocultivo.

Los resultados en general mostraron alta correlación entre los valores observados y los simulados para el sistema de producción arroz monocultivo. La prueba de correlación para los valores observados y simulados mostró altos coeficientes de correlación (Pearson) con buenas estimaciones para producción de grano de maíz (15% de humedad) en todos los años, excepto para 1995 cuando se hizo una subestimación. Para el contenido de biomasa aérea se

observaron aceptables estimaciones en todos los años (± 20), sin considerar la presencia de malezas. Las Figuras 1B y 1C muestran los valores observados y simulados para la producción de grano y biomasa en los sistemas en monocultivo y en rotación durante 1994. Simulaciones similares se realizaron cada año entre 1995 y 1997 (datos no incluidos).

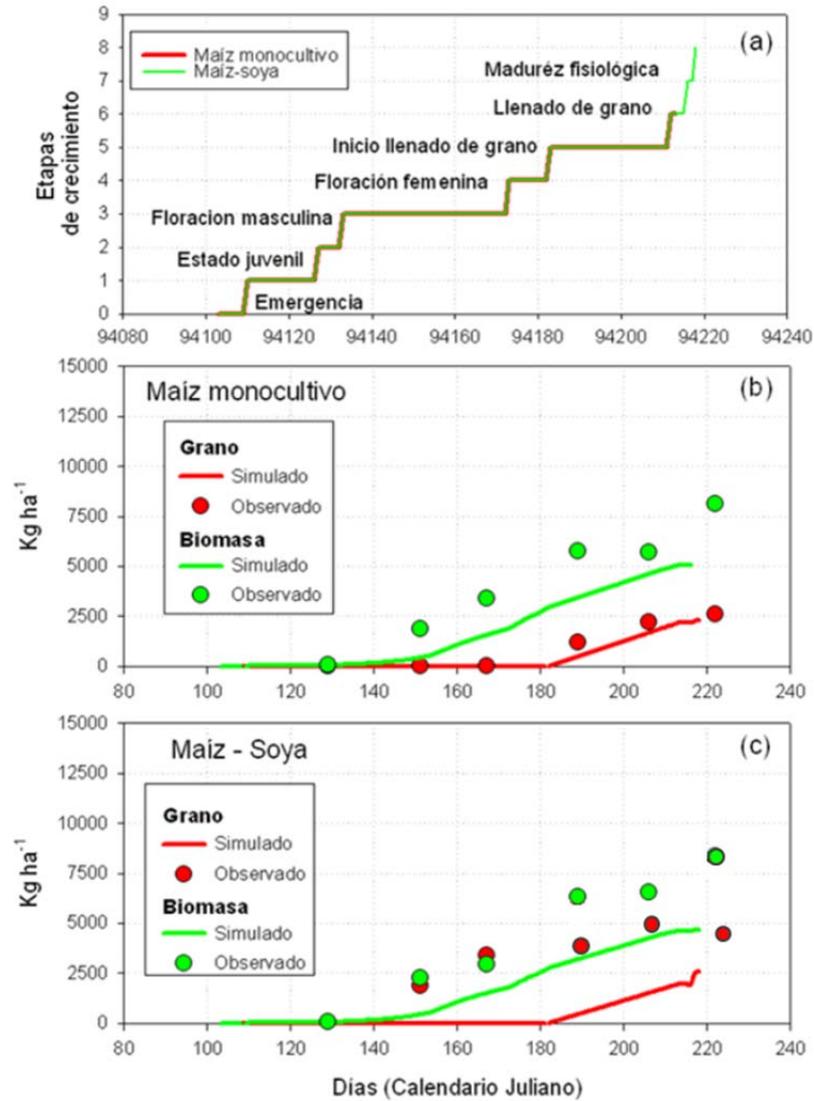


Figura 1. Valores observados y simulados para la producción de grano y biomasa aérea para el cultivo de maíz (kg/ha) en los sistemas (A); maíz monocultivo (B); maíz en rotación con soya (C). CNI, Carimagua, Llanos Orientales de Colombia, 1994.

Cuadro 2. Comparación de valores observados y simulados para las variables mediante el modelo CERES-Maize de la variedad de maíz Sikuaní V-110 en monocultivo desde 1994 a 1997. CNI, Carimagua, Llanos Orientales de Colombia.

Parámetro	1994		1995		1996		1997	
	Observado	Simulado	Observado	Simulado	Observado	Simulado	Observado	Simulado
Días a floración (dds) ^a	64	58	61	60	60	61	62	68
Madurez fisiológica (dds)	119	111	121	111	110	113	112	111
Producción de grano (kg/ha)	2574	2763	4411	2966	3369	3490	2596	3394
Peso por grano (g)	—	0.23	—	0.23	—	0.23	0.32	0.23
No. granos/m ² (No.)	—	1167	—	1284	—	1514	1461	1152
No. granos/mazorca (No.)	—	448.7	—	256.7	—	216	407	264
Biomasa a cosecha (kg/ha)	5296	6268	8839	8986	6900	9726	6974	7325
Tallos a cosecha (kg/ha)	2722	3505	4428	6019	3369	6236	3559	3602
Índice de cosecha (kg)	0.49	0.44	0.50	0.33	0.49	0.36	0.38	0.46
No. final de hojas (No.)	—	20.2	—	21.2	—	20.7	18.0	17.4
N-grano (kg/ha)	38.8	41.4	39.1	45.0	58.2	59.3	39.8	54.3
N-biomasa (kg/ha)	80.7	71.0	82.7	84.4	80.0	97.1	82.1	76.2
N-semilla (%)	1.51	1.50	1.59	1.73	2.01	1.73	1.51	1.62
Correlación (Pearson)	0.95		0.99		0.94		0.98	

a. dds = días después de siembra.

Jones y Kiniry (1986) evaluaron el modelo CERES-Maize usando varios grupos de datos de diferentes localidades que cubrió varias situaciones, y observaron que los valores simulados de índice de área foliar, biomasa aérea, número de granos y rendimiento presentaron correlaciones altamente significativas con los valores medidos. Jagtap et al. (1993) utilizaron el modelo CERES-Maize para validar y simular los rendimientos de grano, peso por grano, granos por metro cuadrado, índice de área foliar y biomasa aérea. Las comparaciones realizadas con datos monitoreados en campo resultaron dentro del 10% de variación, demostrando que las reglas que controlan la partición de los componentes fueron sólidas y adecuadas. Thornton et al. (1995) validaron el modelo para el crecimiento y desarrollo del maíz usando datos experimentales de varios ensayos en Malawi entre 1989 y 1992. Aunque ellos encontraron ligeras sobreestimaciones de rendimiento, concluyeron que los rendimientos simulados estaban razonablemente de acuerdo con un amplio rango de condiciones.

Número de hojas por planta

El número de hojas por planta incrementó hasta la antesis y permaneció constante hasta la madurez fisiológica. No se presentaron diferencias entre este parámetro en los sistemas de producción evaluados. El número total de hojas a la madurez fisiológica, tanto observado como simulado, fue 18, indicando buen ajuste del modelo para este parámetro.

Componentes de rendimiento

Se evaluaron los parámetros peso por grano (g/grano), número de granos por metro cuadrado (No. granos/m²) y número de granos por mazorca (No./mazorca) (Cuadro 2).

- **Peso por grano**
El peso seco por grano promedio observado fue de 0.32 g, valor que difirió significativamente del simulado por el modelo de 0.23 g, subestimado en 28%. La tendencia fue la misma en monocultivo y en rotación. Resultados similares fueron obtenidos por Nagaraju (2006).
- **Número de granos por mazorca**
El número de granos por mazorca fue subestimado por el modelo en un valor alrededor del 50%.
- **Número de granos por unidad de área**
El número de granos por metro cuadrado simulado por el modelo se encontró cercano al número de granos por unidad de área observado.

Muy probablemente, el ajuste logrado en rendimiento de grano se originó principalmente en el ajuste de granos por unidad de área, a pesar de la subestimación del peso por grano y del número de granos por mazorca.

Extracción de N

La extracción de N por hectárea, tanto del grano como de la biomasa producida, presentó en general muy buen ajuste del modelo respecto a los datos observados. Este resultado fue similar al encontrado para la concentración de N en el grano.

Conclusiones

- El modelo CERES-Maize presentó buen ajuste para producción de grano y de biomasa de la variedad de maíz Sikuaní V-110.
- El modelo simuló los diferentes parámetros de N evaluados en grano y en biomasa.
- Para el ajuste óptimo del modelo CERES-Maize se deben considerar otras zonas geográficas y condiciones de manejo que afectan los rendimientos, incluyendo plagas, enfermedades y malezas.

Referencias

- Bowen WT; Baethgen WE 1998. Simulation as a tool for improving nitrogen management. En: Tsuji GY; Hoogenboom G; Thornton PK, eds. Understanding options for agricultural production. Systems approaches for sustainable agricultural development. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Países Bajos. Vol. 7, p 189–204.
- CIAT (Centro Internacional de Agricultura Tropical). 2000. Compile data bases to feed into simulation models and decision support systems. En: Informe Anual 2000. Cali, Colombia. p 115-112.
- Ellis RH; Summerfield RJ; Edmeades GO; Roberts EH. 1992. Photoperiod, temperature, and the interval from sowing to tassel initiation in diverse cultivars of maize. *Crop Science* 32:1225–1232.
- Godwin DC; Jones AC. 1991. Maize phasic development. En: Hanks RJ; Ritchie JT, eds. Modeling plant and soil systems. Agronomy Monograph No. 31. Agronomy Society of America, Crop Science Society of America, Soil Science Society of America, Madison, WI, Estados Unidos. p 55–69.
- Hernández N; Soto F; Caballero A. 2009. Revisión bibliográfica: Modelos de simulación de cultivos, características y usos. *Cultivos Tropicales* 30(1):73–82.
- Hoogenboom G; Wilkens PW; Tsuji GY. 1999. DSSAT version 3 Volume 4. University of Hawaii, Honolulu, HI, Estados Unidos.
- Hoogenboom G; Jones JW; Wilkens PW; Porter CH; Batchelor WD; Hunt LA; Boote KJ; Singh U; Uryasev O; Bowen WT; Gijssman AJ; du Toit AS; White JW; Tsuji GY. 2004. Decision Support System for Agrotechnology Transfer Version 4.0. [CD-ROM]. University of Hawaii, Honolulu, HI, Estados Unidos.

- Hunt LA; Boote KJ. 1998. Data for model operation, calibration, and evaluation. En: Tsuji GY; Hoogenboom G; Thornton PK, eds. Understanding options for agricultural production. Systems approaches for sustainable agricultural development. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Países Bajos. p 9–39.
- International Benchmark Sites Network for Agrotechnology Transfer (IBSNAT). 1989. Experimental design and data collection procedure for IBSNAT: The minimum data set for systems analysis and crop simulation. 3rd ed. Technical Report 1. Department of Agronomy and Soil Science, University of Hawaii, Honolulu, HI, Estados Unidos.
- Jagtap SS; Mornu M; Kang BT. 1993. Simulation of growth, development and yield of maize in the transition zone of Nigeria. *Agricultural Systems* 41(2):215–229.
- Jones CA; Kiniry JR. 1986. CERES-Maize: A simulation model of maize growth and development. Texas A&M University Press, College Station, TX, Estados Unidos. 194 p.
- Jones JW. 1993. Decision support systems for agricultural development. En: Penning de Vries FWT; Teng P; Metselaar K, eds. Systems approaches for agricultural development. Systems approaches for sustainable agricultural development. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Países Bajos. p 459–471.
- Jones JW; Tsuji GY; Hoogenboom G; Hunt LA; Thornton PK; Wilkens PW; Imamura DT; Bowen WT; Singh U. 1998. Decision Support System for Agrotechnology Transfer; DSSAT v 3. En: Tsuji GY; Hoogenboom G; Thornton PK, eds. Understanding options for agricultural production. Systems approaches for sustainable agricultural development. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Países Bajos. p 157–177.
- Jones JW; Hoogenboom G; Porter CH; Boote KJ; Batchelor DW; Hunt LA; Wilkens PW; Singh U; Gijsman AJ; Ritchie JT. 2003. The DSSAT cropping system model. *European Journal of Agronomy* 18:235–265.
- Loague KM; Green RE. 1991. Statistical and graphical methods for evaluating solute transport model. *Journal of Contaminated Hydrology* 7:51–73.
- Monteith JL. 1984. Consistency and convenience in the choice of units for agricultural science. *Experimental Agriculture* 20(2):105–117.
- Nagaraju K. 2006. Studies on optimization of agro-techniques to maximize productivity of winter maize (*Zea mays* L.) and evaluation of DSSAT v 3.5 CERES maize model. Tesis (Ph.D.). University of Agricultural Sciences, Dharwar, Karnata, India. 221 p.
- Porter RJ; Gawith M. 1999. Temperatures and the growth and development of wheat: A review. *European Journal of Agronomy* 10(1):23–36.

- Ritchie JT; NeSmith D.S. 1991. Temperature and crop development. En: Hanks RJ; Ritchie JT, eds. Modeling plant and soil systems. Agronomy Monograph No. 31. Agronomy Society of America, Crop Science Society of America, Soil Science Society of America, Madison, WI, Estados Unidos. p 5–29.
- Suleiman AA; Ritchie JT. 2001 Estimating saturated hydraulic conductivity from soil porosity. Transactions of the ASABE 44(2):235–239.
- Thornton PK; Hoogenboom G. 1994. A computer program to analyze single season crop model outputs. Agronomy Journal 86:860–868.
- Thornton PK; Hoogenboom G; Wilkens PW; Bowen WT. 1995. A computer program to analyze multiple season crop model outputs. Agronomy Journal 87:131–136.
- Thornton PK; Booltink HWG; Stoorvogel JJ. 1997. A computer program for geostatistical and spatial analysis of crop model outputs. Agronomy Journal 89(4):620–627.
- Trudgill DL; Honek A; Li D; Straalen NM. 2005. Thermal time-concepts and utility. Annals of Applied Biology 146:1–14.
- Tsuji G; Uehara G; Balas S. 1994. DSSAT 3, vol. 1, 2 and 3. International Benchmark Sites Network for Agrotechnology Transfer (IBSNAT), University of Hawaii, Honolulu, HI, Estados Unidos.

CAPÍTULO 7

Evaluación de Insectos Plaga y Benéficos en Cultivos en Rotación en Suelos Ácidos de Sabanas

L. D. Ayala¹, I. I. Corrales² y E. Amézquita³

Resumen

En el segundo semestre del 2000 en el Centro Nacional de Investigación (CNI) en Carimagua, Llanos Orientales de Colombia, se realizó un trabajo de campo para determinar, reconocer y clasificar la entomofauna asociada con diferentes modelos sostenibles de producción agropecuaria para la Orinoquia colombiana y establecer programas de manejo integrado de plagas de manera adecuada. Para ello se determinaron y cuantificaron las épocas de aparición, incidencia, dinámica poblacional, hábitos, distribución, y cuantificación de las pérdidas ocasionadas por las principales especies dañinas de insectos. De acuerdo con los estados fenológicos de la soya (*Glycine max* L.) se determinaron las técnicas de muestreo, teniendo como base los problemas entomológicos que se presentan en este cultivo de tipo comercial. Se realizaron muestreos en el suelo, de acuerdo con el tipo de labranza [cincel y labranza cero (no labranza)], en cajuelas de 50 × 50 × 10 cm, muestreos foliares teniendo en cuenta las rotaciones (arroz-soya, maíz-soya), utilizando 'jameos' (pases de red entomológica), golpeos del follaje y muestreos con trampas de luz y color. La mayor incidencia de plagas se presentó al finalizar la etapa de llenado de vainas y en la fase de maduración fisiológica, cuando fue importante la presencia de larvas comedoras de follaje y crisomélidos como *Cerotoma* sp. Las plagas más importantes identificadas dentro de los cultivos fueron crisomélidos, que se presentaron con poblaciones fluctuantes durante todo el ciclo del cultivo. El comportamiento de las plagas en cada tratamiento fue muy similar, lo que indica su distribución uniforme en el cultivo, a excepción de los insectos chupadores, que mostraron cierta preferencia por la rotación arroz-soya. Se observó que *Spodoptera ornitogalli* prefiere ovipositar en lugares poco accesibles para sus controles naturales, que le brindan protección a sus posturas frente a factores abióticos como lluvias y vientos. Se encontró una alta diversidad de especies benéficas, aunque la mayoría en bajas poblaciones. No se encontró un alto porcentaje de parasitismo natural, lo que indica que la eficiencia de los insectos benéficos es muy baja, a excepción del microhimenóptero controlador de posturas de *Nezara viridula*.

1. Entomología, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia. agrocol_fabog@unal.edu.co

2. Agronomía, Consultora. iriscamv@hotmail.com

3. Física de suelos, Consultor Internacional. eamezquitac@gmail.com

El hongo *Noumorea ryleyi* solo se presentó en la fase final del cultivo, por lo que su efecto controlador no fue notorio. El Tachinidae encontrado como parásito de *Diabrotica balteata* solo ejerció presión cuando las poblaciones de éstas eran bajas. La incidencia de plagas no afectó significativamente la producción de soya (<3%), que presentó un rendimiento promedio de 2.2 mg/ha.

Palabras claves: Oxisoles, altillanura, soya, dinámica poblacional de insectos

Introducción

El crecimiento acelerado de la población mundial ha obligado al desarrollo de nuevos sistemas productivos más eficientes que permitan solucionar los problemas alimentarios de los habitantes y brinden la posibilidad de mejorar sus condiciones de vida; como consecuencia, la frontera agrícola se ha expandido hacia otras regiones con poca o ninguna vocación agrícola, a la vez que se han generado nuevos cultivos que son manejados con paquetes tecnológicos tradicionales. Esto ha producido un grave desequilibrio ambiental que favorece el incremento de las poblaciones de insectos plaga que afectan los cultivos y reduce sus controles naturales.

La ausencia de conocimientos sobre aspectos fundamentales, tales como la clasificación de las especies de insectos plaga y benéficos, su grado de incidencia, hábitos, daños, fluctuación de poblaciones y distribución geográfica, han imposibilitado la implementación de programas adecuados de manejo integrado de plagas, que garanticen la competitividad y la sostenibilidad de los nuevos sistemas de producción.

En el segundo semestre del 2000 se realizó un trabajo de campo dentro de las parcelas experimentales del Ensayo Culticore, Fase II, en la altillanura plana de los Llanos Orientales de Colombia, para conocer e identificar la entomofauna asociada y la incidencia sobre la producción de arroz, maíz y soya.

Las evaluaciones se realizaron en el cultivo de soya, correspondiente a los sistemas de producción en rotación arroz-soya y maíz-soya, para determinar, reconocer y clasificar los insectos asociados al cultivo y, de esta manera, sentar las bases para desarrollar programas de manejo integrado de plagas (MIP) racionales y adecuados en modelos productivos como éste.

Materiales y métodos

El trabajo se realizó durante el segundo semestre del 2000 en las parcelas experimentales de los sistemas en rotación de cultivos del Ensayo Culticore, establecido en el Centro Nacional de Investigación (CNI) en Carimagua, Llanos Orientales de Colombia (4° 37' N, 71° 19' O y 175 m.s.n.m.). La precipitación en la zona es monomodal con una época seca entre diciembre y marzo, la precipitación promedio anual es de 2240 mm, con una temperatura de 27 °C. El seguimiento de la entomofauna asociada con los cultivos arroz en rotación con soya y maíz

en rotación con soya, se inició en el segundo semestre de ese año. Se utilizaron diferentes métodos de muestreo con el fin de recolectar e identificar la mayor cantidad de especies de insectos y establecer sus niveles poblacionales y las posibles interacciones entre éstas y el cultivo. Las técnicas de muestreo adoptadas se establecieron de acuerdo con los estados fenológicos del cultivo de soya (Cuadro 1), teniendo como base los problemas entomológicos que se presentan en un cultivo de tipo comercial. La metodología empleada se describe a continuación:

Muestras de suelo

Se realizó mensualmente teniendo en cuenta el tipo de labranza (cincel y labranza cero) en las rotaciones 1 (arroz) y 2 (maíz), tomando cinco sitios/parcela y por repetición en un volumen de 50 × 50 × 10 cm (10 cm de profundidad). El total de muestras en cada uno de los cuatro muestreos realizados durante el ciclo del cultivo fue de 80.

Muestreo de tejido foliar

Para este muestreo se tuvieron en cuenta los tipos de rotación de cultivos, sin considerar el tipo de labranza. Para el efecto, cada semana se hicieron 10 pases de jama por sitio, muestreos por golpe utilizando un cuadro en tela de 1 m² y muestreos visuales al azar en cinco sitios/rotación y repetición. En cada caso se determinaron los porcentajes de daño, tanto por plagas de suelo como de follaje. En los muestreos por golpe se evaluó la incidencia de larvas comedoras de follaje, y en el muestreo visual se evaluaron la presencia de otros estados de desarrollo de los insectos (huevos, ninfas/larvas, adultos) y los daños que ocasionaban, al igual que el control sobre ellos por algunos de sus enemigos naturales.

Cuadro 1. Métodos de muestreo de insectos utilizados de acuerdo con el estado de desarrollo del cultivo. Ensayo Culticore, Llanos Orientales de Colombia.

Estado fenológico	Fase de desarrollo	Descripción	Muestras
Período establecimiento	VE-V3	Germinación, emergencia, plántula	Jameos, visual, % de daño, suelo
Crecimiento vegetativo	V5	Fase vegetativa completa	Jameos, visual, % de daño, suelo
Floración	V8-R2	Formación de botones florales, floración completa	Jameos, visual, % de daño, trampas de luz y color
Llenado de vainas	V10-R5	Inicio del llenado de grano. Inicio del secamiento de hojas	Jameos, visual, % de daño, trampas de luz y color, suelo, golpeteo
Maduración	R8	Defoliación total	% de daño, rendimiento

Las especies encontradas se identificaron en el Centro de Investigación Corpoica-Tibaitatá y en la Facultad de Agronomía de la Universidad Nacional de Colombia, Sede Bogotá. Se recolectó material biológico con el objeto de establecer parasitismo natural en las diferentes etapas del ciclo de vida de los insectos, al igual que la duración de los estados de desarrollo. La determinación del porcentaje de daño se efectuó de acuerdo con la escala visual de evaluación de daños que aparece en el Cuadro 2.

Cuadro 2. Escala visual de evaluación de daño por insectos en cultivos del Ensayo Culticore, Llanos Orientales de Colombia.

Calificación	Tipo de daño	Descripción
1	0	Presencia del insecto Daño <1%
2	Leve	Daño <11%
3	Moderado	Daño 11-20%
4	Grave	Daño >20%

Muestreo con trampas de luz y color

Semanalmente, durante 2 días consecutivos se hicieron observaciones en estas trampas en adultos de *Spodoptera* sp., *Omiodes indicata*, *Anticarsia gemmatalis*, algunos plusínidos y microhimenópteros; el material recolectado fue identificado en el laboratorio y montado para la colección entomológica.

Resultados y discusión

Diagnóstico y reconocimiento de insectos

Plagas en el suelo

Durante el ciclo de cultivo se hicieron cuatro evaluaciones entre el 18 de septiembre y el 12 de diciembre de 2000, observándose baja diversidad de especies perjudiciales para los cultivos (Cuadro 3). Se encontraron insectos de los órdenes Isoptera, Hemiptera y Coleoptera de las familias Elateridae, Scarabeidae, Carabidae, Staphylinidae, Meloidae, Lampyridae y unos pocos crisomélidos de los géneros *Colaspis* y *Cerotoma*.

Los insectos más frecuentes pertenecían a la familia Scarabeidae, localizados en sitios donde existía material orgánico en proceso de descomposición (larvas pequeñas <1.5 cm) o en suelos arcillosos profundos (larvas grandes >1.5 cm) donde, por lo general, fue muy difícil encontrar otros tipos de insectos. Los elatéricos se hallaron en mayor número en el tratamiento D (rotación maíz-soya en siembra directa), debido a la presencia de socas de maíz, cultivo en el cual se comporta como plaga, pero que no afecta el cultivo de soya.

Cuadro 3. Insectos en el suelo asociados con el cultivo de la soya en el Ensayo Culticore, Llanos Orientales de Colombia.

Sistema	Labranza	Trata- miento	Scarabeidae		Elateridae	Chrysomelidae			Carabidae	<i>Anticarsia</i> sp.
			L ^a <1.5 cm	L >1.5 cm	L	P ^a	L	A ^a	A	P
Arroz/soya	Cincel	TA	32	41	53	5	2	10	15	4
	Labranza cero	TB	104	72	89	8	1	5	14	6
Maíz/soya	Cincel	TC	36	56	55	4	1	10	18	1
	Labranza cero	TD	114	46	34	2	7	5	11	5

a. L = larva, P = pupa, A = adulto.

En la fase de establecimiento del cultivo es común que se presenten daños importantes en plántulas por trozadores (*Spodoptera* sp., *Agrotis* sp.) y barrenadores de tallos y raíces; sin embargo, este problema no se presentó en este caso durante el desarrollo del cultivo y *Spodoptera* sp. se comportó simplemente como plaga del follaje.

En la etapa final del cultivo (R8) se observaron, en forma focalizada y con muy baja incidencia, larvas de *Cerotoma facialis* que se alimentaban de nódulos radiculares. La presencia de esta especie se debió a la posible migración de adultos que encontraron el lugar apropiado para establecerse y reproducirse. El daño ocasionado por estas larvas en la fase de maduración del cultivo no tuvo mayor importancia.

Plagas del follaje

- *Rotación arroz-soya:*
 - Crisomélidos del follaje (Coleoptera:Chrysomelidae). Para la evaluación de crisomélidos ('cucarroncitos') se hicieron 11 evaluaciones entre el 4 de octubre y el 2 de diciembre de 2000. En la fase de establecimiento de los cultivos (VE-V3) (Cuadro 4), la incidencia de estos insectos fue baja y el daño no fue significativo ($P > 1\%$), siendo *Systema* sp. el género más representativo. Para el período vegetativo (V5), las poblaciones de este género disminuyeron, ya que se alimentaban de las hojas cotiledonales; por el contrario, la población del género *Diabrotica* sp. aumentó. Durante la floración se observó un número apreciable de crisomélidos del género *Diabrotica* sp. consumiendo flores; los daños se presentaron en focos distribuidos a lo largo de las parcelas en las repeticiones 3 y 4, siendo necesario hacer una aplicación de productos químicos en ambas repeticiones. El género *Cerotoma* sp. fue el de mayor presencia, con un 55.22% de la población total, seguido por *Diabrotica* sp. con 31.81%, *Systema* sp. con 10.89% y *Colaspis* sp. con 2.57% (Cuadro 4).

Las poblaciones de crisomélidos se incrementaron al final del período de llenado de vainas V10-R5, 68 días después de la siembra (dds). Las más altas poblaciones (490 adultos/tratamiento) se presentaron 82 dds, cuando la soya estaba iniciando la fase de maduración (Figura 1). A pesar de que el género *Diabrotica* sp. se presentó durante todo el ciclo vegetativo de cultivo, no logró incrementar sus poblaciones de manera tan abrupta como lo hizo *Cerotoma* sp. Esto puede ser explicado por posibles migraciones de adultos desde zonas aledañas al cultivo, debido a la escasez de alimento, a la competencia intraespecífica por las altas densidades de población dentro de un mismo agroecosistema, a las condiciones climáticas favorables para el insecto como la ausencia de lluvias (Figura 2) en la fase final del ciclo del cultivo y/o porque la mayoría de los adultos presentes o migrantes eran hembras y al llegar al cultivo iniciaron su ciclo reproductivo.

Cuadro 4. Número de crisomélidos por especie en diferentes estados fenológicos del cultivo de soya. Ensayo Culticore, Llanos Orientales de Colombia.

Fase de desarrollo del cultivo	Especies			
	<i>Cerotoma</i> sp.	<i>Diabrotica</i> sp.	<i>Systema</i> sp.	<i>Colaspis</i> sp.
Tratamiento 1 (rotación arroz-soya)				
VE-V3	1	13	52	0
V5	2	21	23	1
V8-R2	12	47	38	3
V10-R5	174	147	17	16
R8	561	204	18	15
Tratamiento 2 (rotación maíz-soya)				
VE-V3	1	19	39	0
V5	21	26	27	2
V8-R2	9	62	19	7
V10-R5	209	140	15	22
R8	367	185	3	5

En arroz-soya, % adultos: *Cerotoma* sp. = 55.22, *Diabrotica* sp. = 31.81, *Systema* sp. = 10.89, *Colaspis* sp. = 2.57

En maíz-soya, % adultos: *Cerotoma* sp. = 50.45, *Diabrotica* sp. = 35.91, *Systema* sp. = 8.56, *Colaspis* sp. = 2.99

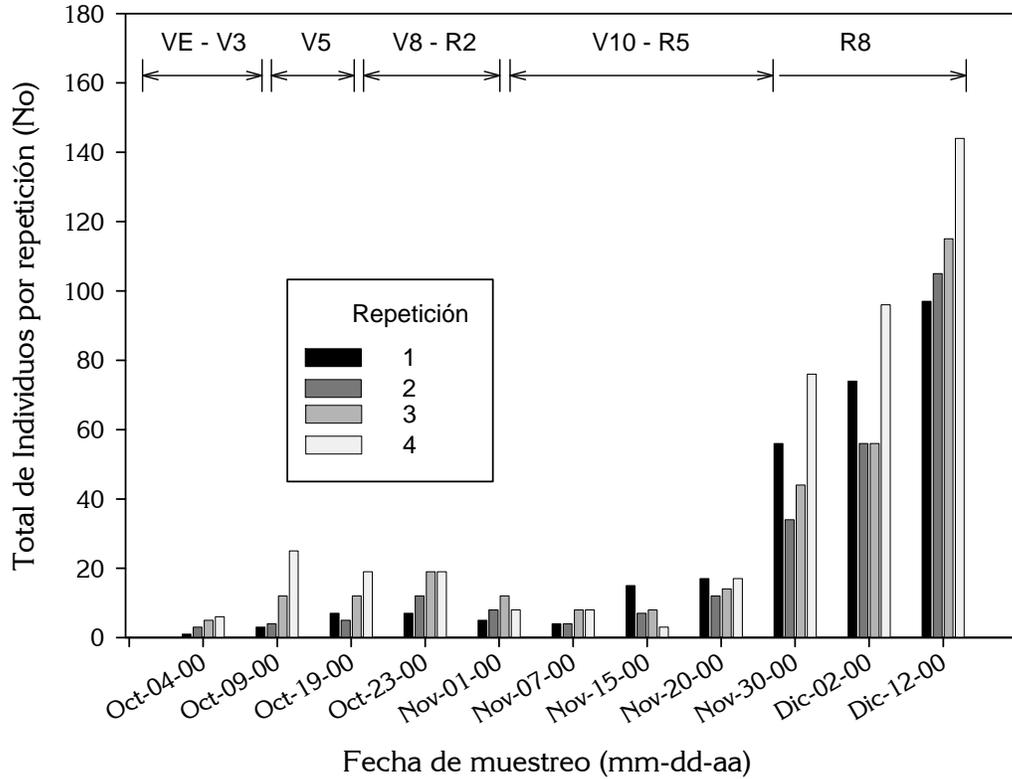


Figura 1. Fluctuación poblacional de crisomélidos en el tratamiento 1, rotación (arroz-soya). Ensayo Culticore, Llanos Orientales de Colombia, 2000.

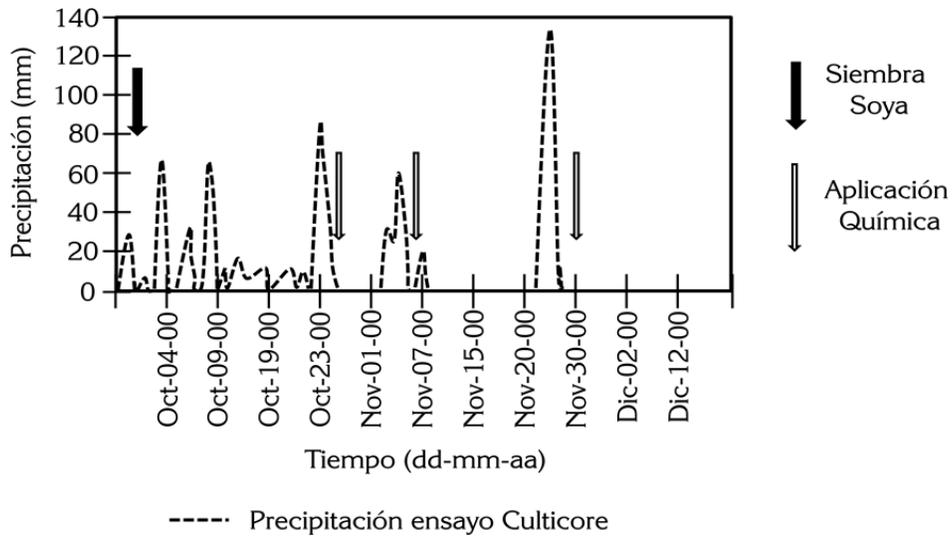


Figura 2. Precipitación diaria durante los muestreos entomológicos. Ensayo Culticore, Llanos Orientales de Colombia, 2000.

Para evaluar la presencia de estas larvas comedoras de follaje se hicieron 11 lecturas entre el 4 de octubre y el 12 de diciembre. La incidencia de estas plagas fue baja (< 10 larvas/tratamiento) hasta los 55 dds; a partir de esta edad y hasta 61 dds, la población de larvas aumentó hasta alcanzar las máximas poblaciones una semana después (Cuadro 5 y Figura 3). *Anticarsia gemmatalis* fue la especie más importante con 144 larvas/tratamiento, 68 dds ($\times 7.2$ larvas/m), seguida por *Pseudoplusia includens* con 57 larvas/tratamiento ($\times 2.8$ larvas/m), *Omiodes indicata* con 31 larvas/tratamiento ($\times 1.5$ larvas/m) y *Spodoptera ornitogalli* con 1 larva/tratamiento ($\times 0.05$ larvas/m).

La baja densidad poblacional de *Spodoptera* sp. se debió al buen control que se alcanzó en las trampas de color ubicadas dentro de las parcelas del ensayo. Estas trampas se colocaron con el fin de hacer seguimiento a las poblaciones de microhimenópteros presentes dentro del cultivo, sin pretender el control del lepidóptero; no obstante, se observó que los adultos de esta especie prefieren

Cuadro 5. Número de larvas comedoras de follaje en diferentes estados fenológicos del cultivo de soya. Ensayo Culticore, Llanos Orientales de Colombia.

Fase de desarrollo del cultivo	Especies			
	<i>Anticarsia gemmatalis</i>	<i>Omiodes indicata</i>	<i>Pseudoplusia includens</i>	<i>Spodoptera ornitogalli</i>
Tratamiento 1 (rotación arroz-soya)				
VE-V3	0	0	0	0
V5	0	1	0	0
V8-R2	0	3	1	0
V10-R5	168	70	87	4
R8	83	21	41	5
Tratamiento 2 (rotación maíz-soya)				
VE-V3	0	0	0	2
V5	0	2	0	0
V8-R2	0	2	0	0
V10-R5	148	36	61	3
R8	84	11	17	2

En arroz-soya, % larvas: *Anticarsia gemmatalis* = 51.85, *Pseudoplusia includens* = 26.65, *Omiodes indicata* = 19.62, *Spodoptera ornitogalli* = 1.85

En maíz-soya, % larvas: *Anticarsia gemmatalis* = 63.04, *Pseudoplusia includens* = 21.19, *Omiodes indicata* = 13.85, *Spodoptera ornitogalli* = 1.90

ovipositar en lugares que garanticen la eclosión de sus posturas, es decir, aquellos que protejan sus huevos de la acción de factores bióticos (controles naturales) y abióticos (lluvias y vientos fuertes) que atentan contra la supervivencia de la especie.

Es importante señalar que en un principio se pensó que los adultos ovipositaban en las trampas atraídos por el color (amarillo), pero se comprobó que ésta no era la razón, ya que al retirar el plástico amarillo los adultos continuaron ovipositando en el mismo sitio; también se pensó que la textura de la madera de dichas trampas tenía un efecto de atracción, pero esta hipótesis fue rechazada porque todas ellas estaban construidas con diferentes tipos de madera y en todas colocaron igualmente las posturas. Finalmente se concluyó que era la posición de la trampa la que ofrecía las condiciones de resguardo y protección antes mencionadas, ya que los adultos del insecto siempre ovipositaban en el mismo lugar (ver Figura 4), siendo menos probable que sus huevos fueran atacados por predadores o parasitoides. Cada semana se encontraron, en promedio, 2.2 y 1.3 posturas grandes por trampa de color y de luz, respectivamente, que contenían entre 60 y 200 huevos. Algunas de estas posturas se recolectaron y se llevaron al laboratorio en busca de parásitos; sin embargo, éstos no se encontraron y la mayoría de larvas emergidas llegaron al estado adulto.

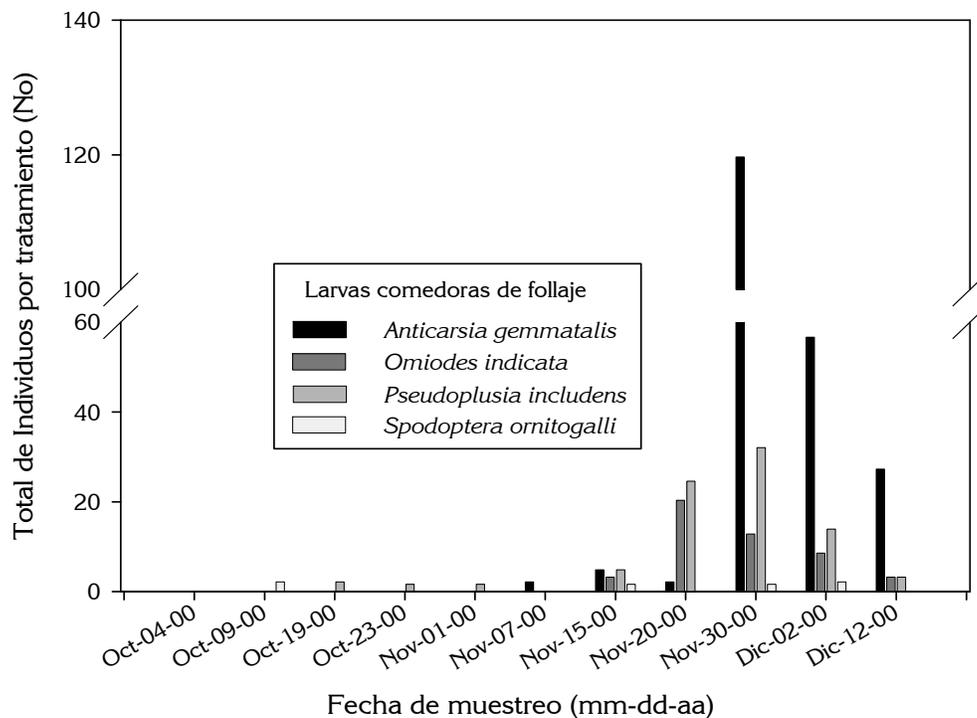


Figura 3. Fluctuación poblacional de larvas comedoras de follaje de soya. Ensayo Culticore, Llanos Orientales de Colombia, 2000.

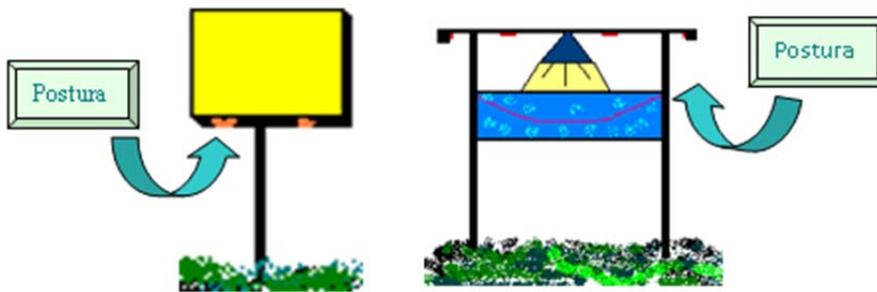


Figura 4. Trampas de color y luz ubicadas dentro de las parcelas del ensayo para evaluar las posturas de *Spodoptera ornitogalli*.

- Insectos chupadores de follaje y vainas (*Cereza vitulis*, *Nezara viridula*, *Euschistus* sp., *Oebalus* sp., *Piezodorus guildinii*). Durante los estados iniciales de desarrollo de los cultivos se observaron altas poblaciones de adultos de la familia Cicadellidae (géneros aún sin identificar) que no ocasionaron daños graves al cultivo (Figura 5). A partir de 48 dds, las poblaciones de estos insectos disminuyeron y conservaron la misma tendencia hasta la etapa de maduración; aunque no se conocen las razones para este comportamiento, posiblemente ocurrieron efectos tardíos en la acción de la aplicación química, inicio de la etapa reproductiva del cultivo o disminución de las lluvias.

Se observó un notable incremento de las poblaciones de chinches chupadores de vainas 55 dds, probablemente por la presencia de áreas cultivadas con arroz dentro del lote experimental, cultivo en el cual estos insectos son plagas importantes, llegando cerca de los niveles de daño económico reportados en la literatura (Cuadro 6). No obstante, las máximas poblaciones se alcanzaron cuando la soya se encontraba en proceso de maduración; por tanto, el daño causado no fue significativo. El género *Oebalus* sp. fue el más frecuente, con 17.97% de la población total, seguido por *Nezara viridula* (9.93%), *Euschistus* sp. (3.31%) y *Piezodorus guildinii* (2.36%) (Cuadro 7).

- Rotación maíz-soya:
 - Crisomélidos del follaje (Coleoptera:Chrysomelidae). El comportamiento de los crisomélidos fue muy similar al presentado en el tratamiento 1 (Cuadro 4 y Figura 6), aunque 82 dds alcanzaron un número menor de adultos/tratamiento (294). El género *Cerotoma* sp. continuó siendo el más abundante (50.45%), seguido por *Diabrotica* sp. (35.91%), *Systema* sp. (8.56%) y *Colaspis* sp. (2.99%). Al comienzo del cultivo, *Systema* sp. fue el género más importante, pero a medida que aumentó la edad del cultivo, el género *Diabrotica* sp. lo desplazó en la etapa final del cultivo. Tal como ocurrió en el tratamiento 1, las poblaciones de *Cerotoma* sp. incrementaron.

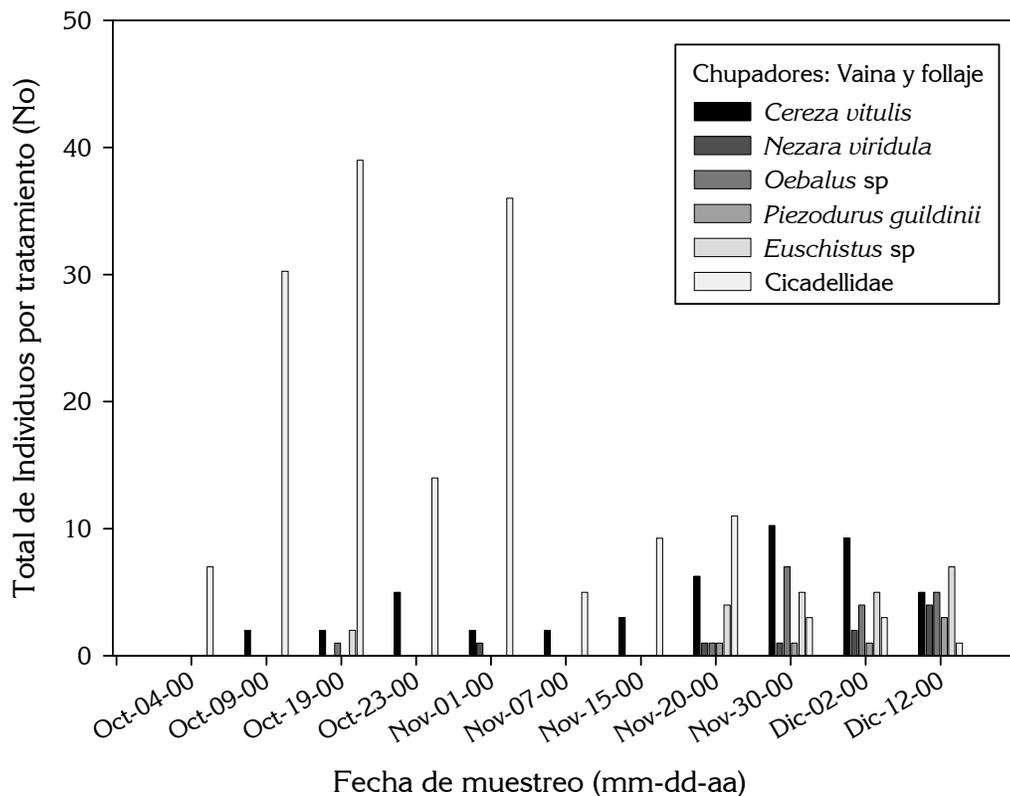


Figura 5. Fluctuación poblacional de insectos chupadores de vainas y follaje, en el tratamiento 2, rotación (maíz-soya). ENSAYO Culticore, Llanos Orientales de Colombia, 2000.

Cuadro 6. Nivel de daño por algunas plagas frecuentes en el cultivo de soya.

Plaga	Época de aparición	Nivel de daño
Larvas defoliadoras	Antes de floración	40 larvas mayores de 15 mm/muestreo, 30% defoliación
	Después de floración	40 larvas mayores de 15 mm/muestreo, 15% defoliación
Chinches	Formación de vainas hasta madurez fisiológica	4 adultos/muestreo
Crisomélidos	Antes de floración	2 adultos/planta, 30% defoliación
	Después de floración	2 adultos/planta, 20% defoliación

FUENTE: Gazzoni et al. (1989).

Cuadro 7. Número de insectos chupadores de follaje y vainas en diferentes estados fenológicos del cultivo de soya. Ensayo Culticore, Llanos Orientales de Colombia.

Fase de desarrollo del cultivo	Especies					
	<i>Cereza vitulis</i>	<i>Nezara viridula</i>	<i>Oebalus</i> sp.	<i>Piezodorus guildinii</i>	<i>Euschistus</i> sp.	Cicadellidae
Tratamiento 1 (rotación arroz-soya)						
VE-V3	1	0	0	0	0	61
V5	6	0	1	0	2	43
V8-R2	5	0	1	0	3	60
V10-R5	20	15	26	6	6	15
R8	27	27	48	4	3	43
Tratamiento 2 (rotación maíz-soya)						
VE-V3	2	0	0	0	0	37
V5	2	0	1	0	2	39
V8-R2	7	1	0	0	0	50
V10-R5	21	2	8	2	9	27
R8	14	6	9	4	12	4

En arroz-soya, % adultos: Cicadellidae = 52.48, *Piezodorus guildinii* = 2.36, *Nezara viridula* = 9.93, *Euschistus* sp. = 3.31, *Oebalus* sp. = 17.97, *Cereza vitulis* = 13.95

En maíz-soya, % adultos: Cicadellidae = 60.77, *Piezodorus guildinii* = 2.31, *Nezara viridula* = 3.46, *Euschistus* sp. = 8.85, *Oebalus* sp. = 6.92, *Cereza vitulis* = 17.69

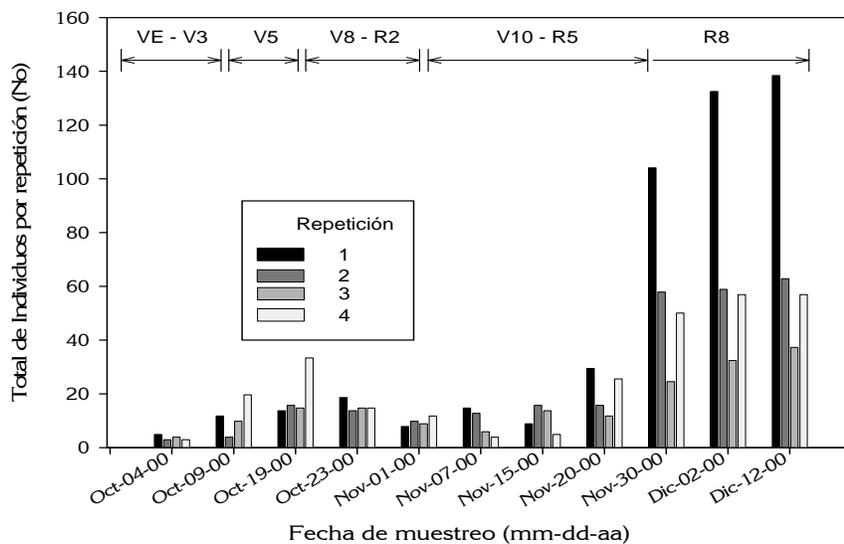


Figura 6. Fluctuación poblacional de crisomélidos en el tratamiento 2, rotación (maíz-soya). Ensayo Culticore, Llanos Orientales de Colombia, 2000.

- Comedores de follaje (*Anticarsia gemmatalis*, *Pseudoplusia includens*, *Omiodes indicata*, *Spodoptera ornitogalli*). Este grupo de insectos mostró un comportamiento similar al descrito para los insectos en el tratamiento 1, pero sus poblaciones fueron inferiores (Cuadro 5 y Figura 7). La especie con mayor porcentaje fue *Anticarsia gemmatalis* (51.85%), seguida de *Pseudoplusia includens* (26.65%), *Omiodes indicata* (19.62%) y *Spodoptera ornitogalli* (1.85%).
- Insectos chupadores de follaje y vainas (*Cereza vitulis*, *Nezara viridula*, *Euschistus* sp., *Oebalus* sp., *Piezodorus guildinii*). En las primeras fases de los cultivos se presentó una alta incidencia de adultos de la familia Cicadellidae, pero posteriormente disminuyó en forma similar a lo que ocurrió en el tratamiento 1 (Figura 8). También se presentaron chinches de la familia Pentatomidae, tales como *Piezodorus guildinii*, *Euschistus* sp., *Nezara viridula* y *Oebalus* sp., pero sus poblaciones permanecieron estables hasta la etapa final del cultivo.

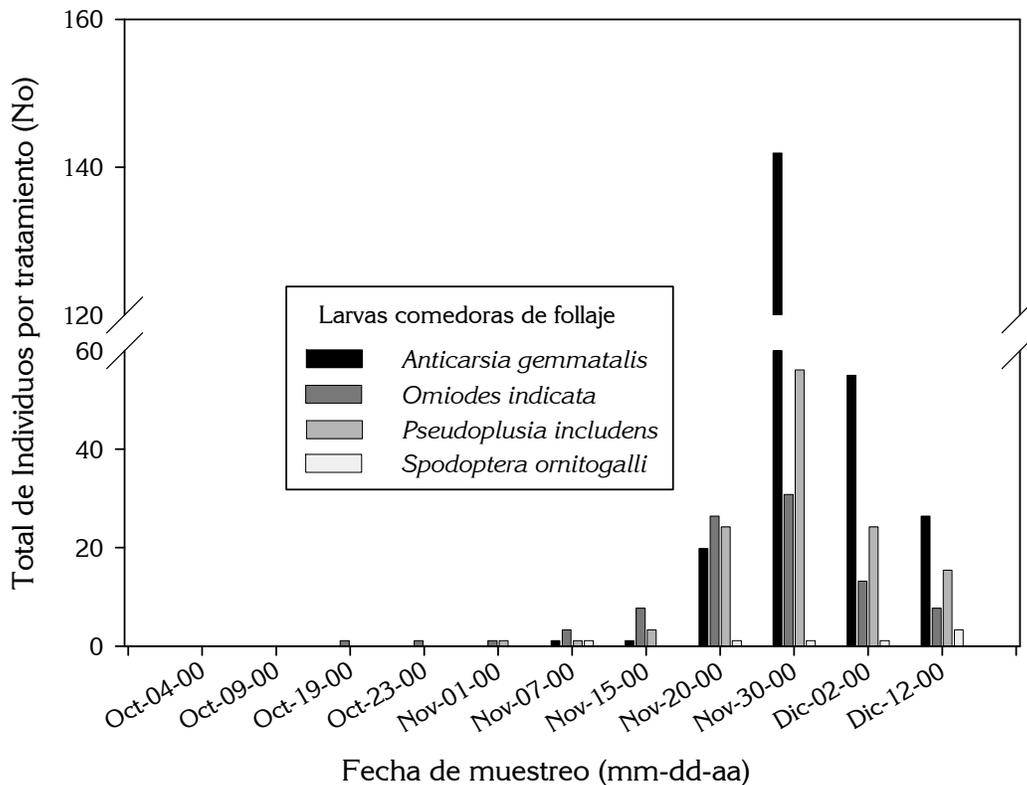


Figura 7. Fluctuación poblacional de larvas comedoras de follaje en el tratamiento 1, rotación (arroz-soya). Ensayo Culticore, Llanos Orientales de Colombia, 2000.

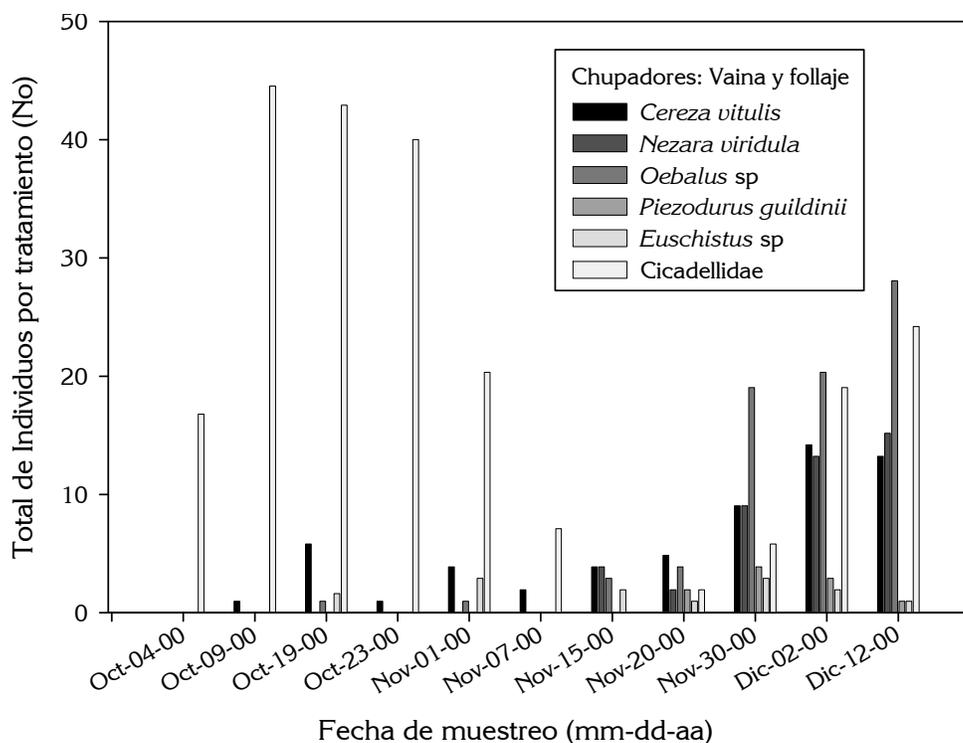


Figura 8. Fluctuación poblacional de insectos chupadores de vainas y follaje en el tratamiento 1, rotación (arroz-soya). Ensayo Culticore, Llanos Orientales de Colombia, 2000.

Insectos benéficos

Para la evaluación de estos insectos se hicieron muestreos con jama para determinar la fluctuación de poblaciones, muestreos visuales para el comportamiento y tipo de insecto benéfico, y mediante la determinación de porcentajes de parasitismo en insectos recolectados en campo y criados en laboratorio.

Se encontró una alta diversidad de especies benéficas (Figuras 9 y 10) dentro del cultivo de soya, aunque la mayoría en bajas poblaciones. Durante los primeros estados de desarrollo de la soya, las poblaciones de arácnidos fueron las más importantes, alcanzando su máxima población a los 33 dds (72 arañas/tratamiento); sin embargo, su densidad de población se redujo notablemente debido a una aplicación química que se hizo en las repeticiones 3 y 4 para controlar crisomélidos, situación que se mantuvo hasta la fase final del cultivo.

Durante la floración y llenado de vainas del cultivo (61 dds), las poblaciones de insectos benéficos permanecieron estables, condición que se mantuvo en las fases siguientes del cultivo dentro del tratamiento 2, mientras que en el tratamiento 1 se observó un aumento importante en el número de individuos de las familias Chalcididae (Himenoptera), Miridae (Hemiptera), Chrysopidae (Neuroptera) y un posible Tachinidae (Diptera) que se encontró parasitando adultos de *Diabrotica balteata*.

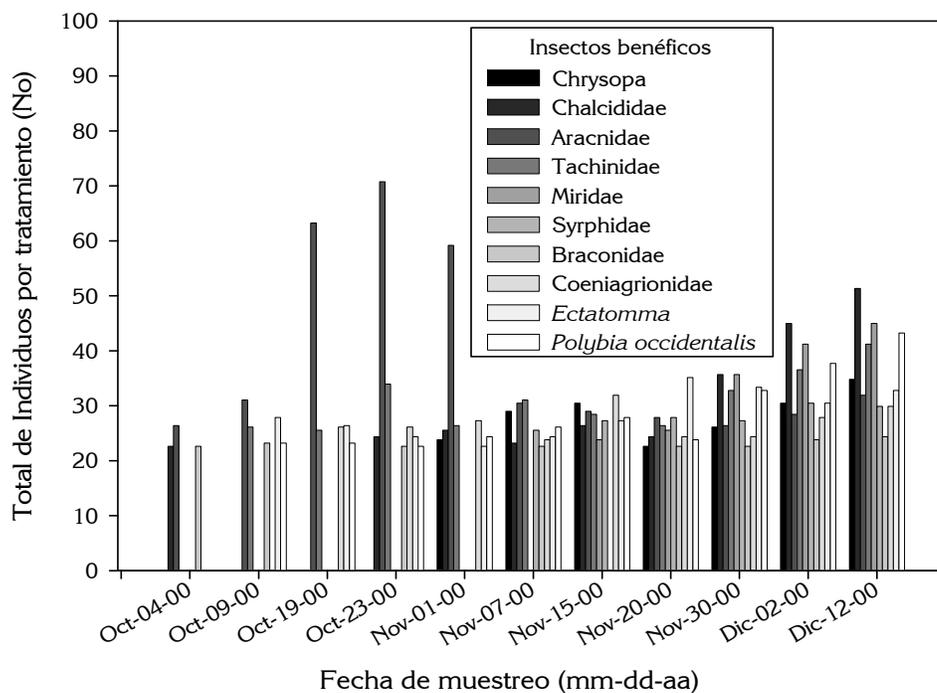


Figura 9. Fluctuación poblacional de algunos insectos benéficos en el tratamiento 1, rotación (arroz-soya). Ensayo Culticore, Llanos Orientales de Colombia, 2000.

La mayoría de insectos benéficos presentes dentro del cultivo eran predadores, y por su condición de polípagos se consideran agentes poco eficientes en el control de especies dañinas; sin embargo, en algunos casos se podrían utilizar como una herramienta más dentro del MIP, como es el caso de avispas del género *Polystes* sp. y *Polybia* sp., las cuales siempre se observaron alimentándose de larvas y huevos de lepidópteros.

Himenoptera (46.87%) fue el orden con mayor número de especies benéficas, en su mayoría endoparásitos de huevos y larvas de lepidópteros; Coleoptera (18.75%), Hemiptera (15.62%) y Diptera (6.25%), entre otros, también fueron identificados (Cuadro 8).

Un bajo porcentaje del material biológico evaluado en el laboratorio resultó parasitado; solo se encontraron dos casos importantes: (1) posturas de *Nezara viridula*, parasitadas por un microhimenóptero, aún sin identificar, y (2) adultos de *Diabrotica balteata* parasitados por un posible Tachinidae (género sin identificar). En el primer caso se presentó un alto porcentaje de parasitismo (87.5%), mientras que en el segundo fue solo de 24.5% (Cuadro 9).

En la última evaluación realizada dentro del cultivo, se encontraron cinco larvas de *Anticarsia gemmatalis* momificadas por el hongo *Noumorea rileyi*; no obstante, el hecho de que las poblaciones de larvas hayan aparecido en la fase final del cultivo, no permitió que se observara su eficiencia como agente microbiológico.

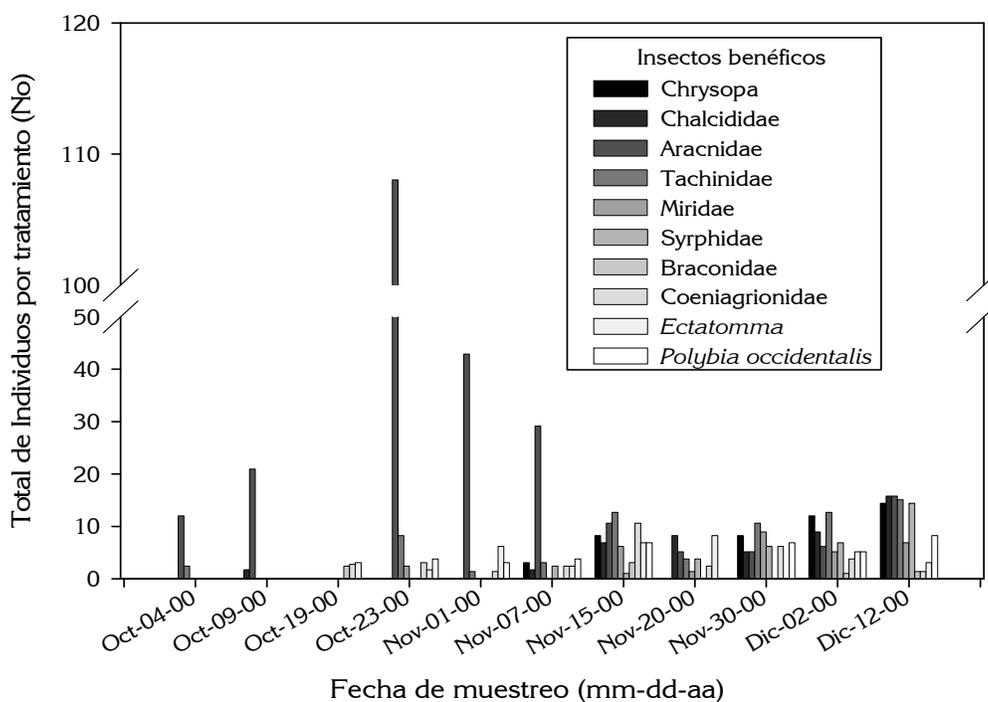


Figura 10. Fluctuación poblacional de algunos insectos benéficos en el tratamiento 2, rotación (maíz-soya). Ensayo Culticore, Llanos Orientales de Colombia, 2000.

Conclusiones

- De acuerdo con los estados fenológicos del cultivo, el mayor grado de incidencia de plagas se presentó al final de la etapa de llenado de vainas y en la fase de maduración. Esto coincidió con las bajas precipitaciones que se presentaron durante el tiempo del ensayo, lo que permitió el establecimiento de plagas como *Cerotoma* sp. y larvas comedoras de follaje.
- La plaga más importante hallada dentro de los cultivos fueron crisomélidos, que se presentaron durante todo el ciclo de cultivo, con poblaciones bajas, pero fluctuantes en el tiempo; sin embargo, gracias a los muestreos periódicos, los daños no alcanzaron el umbral de daño económico.
- El comportamiento de las plagas dentro de cada tratamiento fue muy similar, lo que indica su distribución uniforme en el cultivo, a excepción de los insectos chupadores, que mostraron algo de preferencia por el tratamiento 1 (arroz-soya), debido a la presencia de áreas con arroz.

Cuadro 9. Parasitismo natural encontrado en diferentes fases de desarrollo del cultivo de soya. Ensayo Culticore, Llanos Orientales de Colombia.

Fase de desarrollo del cultivo	Posturas de <i>Nezara viridula</i>		Huevos/postura (no.)		Adultos de <i>Diabrotica balteata</i>	
	Recolectadas	Parasitadas	Recolectadas	Parasitadas	Recolectadas	Parasitadas
VE-V3	0	0	0	0	2	2
V5	0	0	0	0	20	7
V8-R2	0	0	0	0	40	11
V10-R5	9	8	39	34	40	5
R8	7	6	22	21	0	0

% parasitismo en: posturas de *Nezara viridula* = 87.5, huevos de *Nezara viridula* = 90.2;
Diabrotica balteata = 24.5

- *Spodoptera ornitogalli* sobresalió por su hábito de oviposición en sitios poco accesibles para sus controles naturales y que le brindan protección a sus posturas ante la acción de factores abióticos adversos (lluvias y vientos fuertes).
- Se encontró una alta diversidad de especies benéficas dentro del cultivo de soya, aunque la mayoría en bajas poblaciones; por tanto, es importante evaluar las condiciones necesarias para que estos insectos incrementen su densidad poblacional.
- El porcentaje de parasitismo natural dentro de las especies muestreadas fue bajo; por lo tanto, la eficiencia de los insectos benéficos encontrados no es significativa, a excepción de un microhimenóptero controlador de posturas de *Nezara viridula*.
- El hongo *Noumorea ryleyi* solamente se presentó en la fase final del cultivo; en consecuencia no fue posible evaluar su acción como agente microbiológico.
- En el cultivo de soya, tanto las plagas en el suelo como las de follaje, se pueden presentar como plagas potenciales en los cultivos en rotación siguientes, por lo cual es importante incluirlas dentro del plan de manejo.
- El Tachinidae encontrado como parásito de *Diabrotica balteata*, ejerció presión sobre sus poblaciones cuando eran bajas, pero a medida que se incrementaron no se presentó parasitismo, por lo que se puede considerar un control poco eficiente.
- La incidencia de plagas no afectó de manera significativa la producción de soya (<3%), que alcanzó un buen rendimiento (2.2 mg/ha), por lo que se puede concluir que el manejo de plagas dentro del cultivo fue eficiente.

Referencias

- Gazzoni DL et al. 1989. Manejo de pragas da soja. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa), Londrina, Brasil. 85 p.
- Jiménez JJ; Rossi JP; Lavelle P. 2001. Spatial distribution of earthworms in acid-soil savannas of the Eastern Plains of Colombia. En: Jiménez JJ; Thomas RJ, eds. Nature's plow: Soil macroinvertebrate communities in the neotropical savannas of Colombia. Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), Cali, Colombia. p 104-120.

Establecimiento de Sistemas Agropastoriles y su Efecto en el Rendimiento de Cultivos en Suelos Ácidos de Sabanas

M. Rivera¹, E. Amézquita², I. M. Rao³, I. I. Corrales⁴ y L. F. Chávez⁵

Resumen

El efecto residual de sistemas de producción, basados en cultivos de arroz y de maíz, que incluyeron monocultivos, sistemas en rotación con caupí y soya, y pasturas asociadas con leguminosas forrajeras, Fase I, fue evaluado en el rendimiento de cultivos y propiedades físico-químicas del suelo durante los años 2000 y 2001, Fase II, para determinar si las condiciones del suelo logradas durante la Fase I de experimentación permitían el establecimiento exitoso de cultivos de arroz y maíz manejados en rotación con soya, con labranza cero (siembra directa) y labranza reducida (cincel). Los resultados mostraron diferencias significativas ($P < 0.05$), para las características físico-químicas de suelo, evaluadas al final de la Fase I (1998). En la Fase II se presentaron diferencias significativas en algunos de los parámetros físicos evaluados para tipos de labranza y sistemas de producción. Al final de la Fase I, los sistemas provenientes de las rotaciones con leguminosas manejadas para incorporación como abono verde presentaron las mejores condiciones de fertilidad, con mayores valores de P, K, Ca y Mg. En la Fase II, el sistema con valores más altos de P fue el proveniente de la rotación arroz-caupí, incorporado como abono verde. Los mayores rendimientos de arroz y maíz grano se obtuvieron en el año 2000, bajo siembra directa. Los valores más altos para rendimiento de arroz grano (3.83 t/ha) y de maíz grano (4.71 t/ha) correspondieron a los sistemas provenientes de la pastura *Panicum maximum*, manejados en siembra directa, seguidos de los sistemas provenientes de las rotaciones con caupí y soya, incorporadas como abono verde.

Palabras claves: agricultura sostenible, sistemas en rotación, labranza de conservación

-
1. Física de suelos/Agronomía, Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), Cali, Colombia. m.rivera@cgiar.org
 2. Física de suelos, Consultor Internacional. eamezquitac@gmail.com
 3. Fisiología y Nutrición de plantas, CIAT. i.rao@cgiar.org
 4. Agronomía, Consultora. iriscamv@hotmail.com
 5. Gestión ambiental, Cerrejón, Colombia. LCHAVE1@cerrejoncoal.com

Introducción

Las sabanas neotropicales de América del Sur tropical cubren cerca 270 millones de hectáreas, incluyendo 207 millones en Brasil, 28 millones en Venezuela, 17 millones en Colombia, 14 millones en Bolivia y 4 millones en Guyana (Cole, 1986), utilizadas en ganadería extensiva y sistemas de baja productividad (Vera y Seré, 1985), debido al bajo valor nutritivo de las especies nativas predominantes (Álvarez y Lascano, 1987). El P es el principal nutriente limitante para la producción de cultivos en suelos tropicales altamente meteorizados (Rao et al., 1999). Los Llanos Orientales de Colombia ocupan cerca del 19% del territorio nacional. La altillanura plana ocupa 4.6 millones de hectáreas; por las características de su relieve es el área más apta para la expansión de la agricultura (Rippstein et al., 2001). Los suelos de los Llanos Orientales de Colombia se dividen en Oxisoles que ocupan, aproximadamente, cerca del 75% del área (Soil Survey Staff, 1994; Rippstein et al., 2001).

El impacto ambiental de la producción agropecuaria en ecosistemas frágiles de sabanas depende de cómo se logre el incremento de la producción. La producción puede ser incrementada mediante la ampliación de las zonas agrícolas y ganaderas, adicionando áreas nuevas para la producción agropecuaria y/o mediante la intensificación (logrando mayores rendimientos a través del incremento de insumos, mejoramiento de prácticas agrícolas, siembra de variedades mejoradas y otro tipo de innovaciones). La fertilidad natural del suelo puede ser mejorada mediante el uso de leguminosas adaptadas, proporcionando mayores rendimientos con menos cantidad de fertilizantes nitrogenados (Tilman et al., 2011).

El sector agropecuario en la zona aumentaría sosteniblemente el área utilizada y su productividad con base en investigación y desarrollo en genética y en optimización de los servicios ambientales. Se extendería la rotación de cultivos y las oleaginosas de ciclo corto tomarían un mayor peso en la economía (Benavides, 2010).

La agricultura intensiva de sistemas en monocultivo se caracteriza por la reducción de la producción en el corto plazo, hasta niveles que no son económicamente sostenibles, debido al incremento de problemas plenamente identificados como plagas, enfermedades, malezas, erosión y compactación del suelo, además de la pérdida de capacidad de almacenamiento de agua de los suelos, entre otros factores limitantes para el desarrollo de las plantas (Friesen et al., 1998).

La rotación de cultivos de gramíneas y leguminosas es una alternativa promisoría, ya que las leguminosas proveen N adicional al sistema y mejoran la calidad del suelo mediante el aumento de residuos orgánicos, favoreciendo el almacenamiento de agua en el perfil y la capacidad de infiltración y reduciendo la escorrentía y la erosión (Brady y Weil, 2002; Stanger y Laurer, 2008); adicionalmente reduce la densidad aparente y la susceptibilidad a la compactación y aumenta los contenidos de N, K, Ca y Mg en el suelo, proporcionando un

ambiente favorable para el crecimiento y desarrollo de las raíces de las plantas (Sánchez y Salinas, 1981).

La integración de la agricultura y la ganadería en sistemas agropastoriles maximiza el desempeño individual de cada componente, tornándolos altamente complementarios (Spain, 1993). La rotación de cultivos en el largo plazo, combinada con un apropiado manejo de la labranza, mejora las condiciones generales del suelo e incrementa los rendimientos de cultivos (Friesen et al., 1997).

Los rendimientos potenciales de los sistemas de cultivos manejados en siembra directa son generalmente mayores que los manejados mediante labranza convencional debido, principalmente, a la mayor cantidad de agua disponible para los cultivos, mayor cantidad de materia orgánica en el suelo asociada con una mayor tasa de reciclaje de nutrientes, y mejores características estructurales asociadas con mejor aireación (Cook, 2006). La labranza intensiva contribuye, en gran medida, a la liberación del carbono del suelo, ya que expone la materia orgánica a oxidación y erosión (West et al., 2010). No obstante el avance en el conocimiento de estos sistemas de producción y sus ventajas, aún son necesarios esfuerzos adicionales para una mayor comprensión de las interrelaciones entre suelo, cultivo y ambiente, incluyendo procesos que regulan las relaciones entre insumos agrícolas, calidad de suelo, clima y productividad de cultivos (Chen et al., 2011). El reto para los investigadores, además de incrementar los rendimientos agrícolas y pecuarios, es propender por el mantenimiento de los recursos naturales, con objetivos que enfatizan en el incremento de la eficiencia en el uso de insumos, reducción de riesgos y preservación del ambiente (Godfray, 2011).

La intensificación de la producción agrícola y pecuaria en los Llanos Orientales de Colombia con cultivos de maíz, soya y sorgo, ha creado la necesidad de desarrollar investigaciones en sistemas de manejo y producción adecuados a las condiciones de los suelos, con el fin de aumentar su productividad de manera sostenible, evitando la degradación de sus propiedades físicas, químicas y biológicas (Amézquita et al., 1997).

El Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), en convenio con la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (Corpoica), establecieron en 1993, en el Centro Nacional de Investigación (CNI) en Carimagua, Llanos Orientales de Colombia, la Fase I del Ensayo Culticore, con el propósito de documentar los procesos químicos, físicos y biológicos ocurridos en suelos manejados con diferentes sistemas agropastoriles. Las investigaciones incluyeron diversos tópicos, tales como producción en monocultivo, sistemas en rotación y establecimiento de pasturas mediante cultivos; asimismo, la optimización del uso de fertilizantes, el reciclaje de nutrientes y el manejo integral de la condición físico-química y biológica del suelo.

En el 2000 se inició la Fase II del Ensayo, con el fin de determinar si el mejoramiento conseguido durante la Fase I era suficiente para garantizar la productividad de cultivos mediante el establecimiento en sistema de siembra directa, una práctica conservacionista

establecida en los Cerrados de Brasil, región similar en condiciones de suelo a la altillanura de los Llanos Orientales de Colombia. En esta Fase II, dentro de la investigación se introdujo el concepto *Capa Arable*, una tecnología que permite construir condiciones más favorables para el desarrollo de las plantas, mediante el mejoramiento integral de las propiedades químicas, físicas y biológicas del suelo, previo a la aplicación de prácticas como la siembra directa.

Materiales y métodos

Localización, clima y suelos

Los trabajos de investigación se desarrollaron en el CNI, en Carimagua, localizado a 4° 37' N, 71° 19' O y 175 m.s.n.m., en las sabanas isohipertérmicas bien drenadas de los Llanos Orientales de Colombia, con un promedio anual de precipitación de 2240 mm y una temperatura promedio de 27 °C, con una época seca entre noviembre y marzo.

En las sabanas altas de los Llanos Orientales de Colombia predominan Oxisoles, caracterizados por su baja fertilidad natural con pH <4.5, valores bajos de Ca, Mg y K intercambiable y una alta saturación de Al >90% (Jiménez et al., 2001). Los suelos son profundos, tienen en general buenas condiciones físicas, excepto por los altos valores de densidad aparente en condiciones naturales; se clasifican como Typic Haplustox Isohipertérmicos caoliníticos, en el sistema de USDA (Soil Survey Staff, 1994). Antes del establecimiento del Ensayo, el área se encontraba en sabana nativa en explotaciones ganaderas de tipo extensivo.

Tratamientos

La Fase I comenzó en 1993 y finalizó en 1998, y su objetivo fue evaluar la sostenibilidad de diferentes sistemas agropastoriles basados en los cultivos de arroz y maíz, que incluyeron los siguientes tratamientos (T): T1, arroz monocultivo; T2, arroz en rotación con caupí incorporado como abono verde; T3, arroz en rotación con caupí para producción de grano; T4, sabana nativa; T5, pastura de *Brachiaria humidicola* asociada con leguminosas forrajeras (*Stylosanthes capitata*, *Centrosema acutifolium* y *Arachis pintoi*); T6, maíz monocultivo; T7, maíz en rotación con soya incorporada como abono verde; T8, maíz en rotación con soya para producción de grano; T9, sabana nativa; T10, pastura de *Panicum maximum* asociada con leguminosas forrajeras (*Glycine wightii* y *Arachis pintoi*).

Diseño experimental

En la Fase I, los tratamientos se distribuyeron en un diseño de bloques al azar, con cuatro repeticiones, tanto para los sistemas basados en el cultivo del arroz (T1 a T5), como para los sistemas basados en el cultivo de maíz; el tamaño de las parcelas para los monocultivos y cultivos en rotación fue de 3600 m² (18 × 200 m) y para las pasturas fue de 7200 m²

(200 × 36 m), dimensiones que permitieron el manejo de maquinaria comercial y la rotación de potreros en el pastoreo de gramíneas.

Manejo agronómico

En la Fase I del Ensayo se realizaron aplicaciones de cal en cantidades bajas (0.5 mg/ha) para los sistemas basados en el cultivo de arroz, y altas (2.0 mg/ha) para los sistemas basados en el cultivo maíz. En el cultivo de arroz, la cal se aplicó como fuente de Ca y Mg y en maíz para reducir la saturación de Al hasta niveles tolerables por los cultivares utilizados; como mantenimiento, posteriormente cada año se aplicaron, de manera uniforme, 200 kg/ha de cal dolomita. El cultivo de arroz se fertilizó (kg/ha), con P (60), N (80), K (100), Mg (20), S (26) y Zn (10), mientras que el cultivo de maíz recibió N (120), P (80), K (100), Mg (20) y Zn (10). El N y el K se fraccionaron en aplicaciones cada 2, 6 y 9 semanas después de la siembra, así: la primera aplicación de N fue de 20 kg/ha y las dos restantes de 30 kg/ha cada una; el K se aplicó en partes iguales de 33 kg/ha cada una. En los sistemas de rotación arroz-caupí y arroz o maíz con soya se aplicaron (kg/ha) P (40), N (20), K (50), Mg (10), S (13) y Zn (10).

Las pasturas *B. humidicola* y *P. maximum* se sembraron luego del establecimiento del cultivo de arroz y/o maíz, respectivamente, manejadas con pastoreo de animales alrededor de 4 años y fertilizadas bianualmente con P, 20 kg/ha. Las parcelas de sabana nativa se mantuvieron en sus condiciones naturales para ser comparadas con los otros sistemas como línea base. Durante la Fase I se realizó labranza de suelo convencional que incluyó arado de discos (3 o 4 pases) antes de cada ciclo de cultivo. Las densidades de siembra de los cultivos fueron de 80 y 25 kg/ha para arroz y maíz, respectivamente. El manejo de los sistemas de producción durante esta primera fase se realizó durante 5 años.

En el 2000 comenzó la Fase II, 7 años después del establecimiento de los sistemas agropastoriles, con el objetivo de evaluar el efecto residual de los sistemas de producción establecidos en la Fase I en las rotaciones arroz-soya y maíz-soya. En estas rotaciones se evaluaron dos tipos de labranza y se realizaron aplicaciones de 300 kg/ha de cal dolomita como fuente de Ca y Mg, 30 días antes del establecimiento de los cultivos. Los tratamientos de labranza fueron: (1) labranza cero, con siembra directa y (2) labranza mínima, que consistió en dos pases de arado de cincel con palas separadas 60 cm entre sí y manejadas a 30 cm de profundidad, seguidos de un pase de arado de disco para mejorar las condiciones de uniformidad al momento de la siembra. En labranza cero se utilizó una sembradora para siembra directa. En la Fase II, la distribución se realizó en un diseño de parcelas divididas, donde las parcelas principales fueron los sistemas agropastoriles basados en arroz (T1 a T5) y en maíz (T6 a T10), y las subparcelas correspondieron al tipo de labranza (labranza cero y labranza mínima).

En este ensayo se emplearon los cultivares de arroz seco Oryzica Sabana 10, Oryzica Sabana 6 y la línea-30, materiales tolerantes a alta saturación de Al y acidez en el suelo, y un

material precoz de 90 días de ciclo vegetativo, el cultivar de maíz Sikuaní-V110 y el híbrido H108, igualmente tolerantes a alta saturación de Al.

Muestreo de suelos y determinaciones físico-químicas

Para determinar los efectos acumulados de los sistemas de producción en las propiedades del suelo, se realizaron muestreos en diferentes épocas del desarrollo del ensayo. Las muestras de suelo se tomaron a profundidades de 0 a 10, 10 a 20 y 20 a 40 cm antes de la siembra y después de la cosecha en cada ciclo de cultivo. Durante estas fechas también se muestrearon los sistemas en sabana nativa y pasturas. En cada tratamiento se tomaron 10 muestras por profundidad utilizando un barreno hidráulico de 5 cm de diámetro. Estas muestras se analizaron en el Laboratorio de Servicios Analíticos del CIAT para pH_(H₂O), mediante potenciómetro, cationes intercambiables Ca, Mg y Al utilizando extracción con KCl 1N y determinación por absorción atómica, P y K (extracción por Bray II).

Para la caracterización física se realizaron muestreos no-disturbados de suelos en cilindros metálicos para los parámetros densidad aparente (Bouyucos), porosidad total (densidad aparente y real), distribución de poros (macroporos, mesoporos y microporos), conductividad hidráulica saturada (permeámetro de cabeza constante), susceptibilidad a la compactación (Próctor), curvas de retención de humedad (mesa de tensión–ollas de presión). También se determinó resistencia a la penetración vertical, la cual se realizó *in situ* con penetrómetro de cono, Daiki (DIK-5520).

Rendimientos de los cultivos

Los rendimientos de grano de los cultivos de maíz, arroz y soya se determinaron durante la época de madurez de cosecha de cada cultivo. La cosecha se realizó de forma manual; en arroz, la cosecha se realizó en áreas de 25 m²; en maíz se evaluaron cinco surcos de 10 m de longitud para un total de 40 m²; los rendimientos fueron ajustados por contenido de humedad.

Análisis estadístico

En las Fases I y II se realizaron análisis de varianzas (ANOVA), para los parámetros de suelo (físico-químicas) y para rendimiento de cultivos en cada una de las fechas de muestreo, para determinar el impacto de los sistemas de producción, tanto en su desempeño como en las características de suelo, y en la Fase II para evaluar el efecto residual de los sistemas de producción establecidos en la Fase I y su interacción con los sistemas de labranza. La diferencia de medias fue separada mediante la prueba de diferencias mínimas significativas (DMS) $P < 0.05$ (SAS Institute Inc., 1999).

Resultados y discusión

Características químicas de los suelos

Fase I

En general, las características químicas de suelo previo al establecimiento de los sistemas de producción no presentaron diferencias. La saturación de Al, un mes después de la aplicación de cal, no presentó diferencias significativas en los sistemas basados en arroz, como era de esperarse, dada la baja cantidad aplicada, 0.5 t/ha. En los sistemas basados en maíz, el promedio de saturación de Al fue de 41.6% después de la aplicación de 2.0 t/ha de cal, saturación adecuada para el crecimiento del cultivar utilizado (Cuadros 1 y 2).

En 1998, al finalizar la Fase I, las características químicas de suelo entre 0 y 20 cm de profundidad presentaron diferencias entre los sistemas basados en el cultivo de arroz (T1 a T5). El sistema arroz en rotación con caupí incorporado como abono verde presentó el nivel más alto de fertilidad, con mayores concentraciones de P, K, Ca y Mg y el valor más bajo de pH. En los sistemas basados en maíz, la rotación de maíz con soya incorporada como abono verde presentó incremento en P, K y Ca; además, entre 20 y 40 cm de profundidad presentó mayores contenidos de Ca y Mg; probablemente la incorporación del abono verde facilitó su movimiento a horizontes inferiores.

Al final de la Fase I, en promedio en los sistemas basados en arroz entre 0 y 10 cm de profundidad, los contenidos de P, Mg, Ca y K aumentaron 9.2, 2.6, 1.9 y 1.5 veces, respectivamente, en relación con los contenidos promedios iniciales (1993). En los suelos con sistemas basados en maíz, el contenido de P aumentó en menor proporción (1.6 veces), mientras que los contenidos de Ca y Mg tendieron a disminuir y el K aumentó 1.7 veces. Estas diferencias en fertilidad del suelo entre cultivos se debieron, posiblemente, a que el cultivo de maíz extrae mayor cantidad de nutrientes por su mayor biomasa aérea y producción de grano, en comparación con el cultivo de arroz (Rivera, 2003).

El contenido de P disponible al final de la Fase I, de 0 a 10 cm de profundidad, incrementó significativamente a valores por encima de los niveles críticos, 10-15 mg/kg, considerados para cultivos anuales en Colombia (Sánchez y Salinas, 1981) en las rotaciones de arroz-caupí y maíz-soya, tanto incorporadas como abono verde como manejadas para producción de grano. Los monocultivos arroz y maíz, aunque presentaron valores superiores a la sabana nativa, permanecieron por debajo de los niveles críticos, al igual que las pasturas de *B. humidicola* y *P. maximum*. En la Fase II se mantuvo la tendencia presentada en la Fase I.

Fase II

En el 2001, en general todos los sistemas de producción provenientes de arroz y maíz disminuyeron el contenido de P a la profundidad de 0 a 20 cm, excepto en las rotaciones arroz-caupí y maíz-soya, que aumentaron tanto incorporadas como abono verde como manejadas para producción de grano (Cuadros 1 y 2).

Los cambios más significativos ocurrieron a la profundidad de 0 a 10 cm, en los sistemas provenientes de arroz. Las rotaciones, en promedio, pasaron de 23 a 28 de P mg/kg, mientras que en los sistemas provenientes de maíz pasaron, en promedio, de 16 a 21 de P mg/kg. Los sistemas que presentaron los valores más altos de P fueron arroz-caupí y maíz-soya, cuando las leguminosas se incorporaron como abono verde, con valores promedio de 33 y 24 de P (en mg/kg), respectivamente. Los sistemas provenientes de arroz y maíz monocultivo presentaron valores de 8.5 y 3.5 de P (en mg/kg), respectivamente, equivalentes al 26 y 15% del P presentado en los provenientes de las rotaciones arroz-caupí y maíz-soya, cuando las leguminosas se incorporaron como abono verde.

En general, el pH en el suelo aumentó en todos los sistemas de producción, en especial en los provenientes de monocultivos y en las pasturas. El valor del pH en los sistemas provenientes de monocultivo arroz y maíz fue de 5.15 y 5.20, respectivamente, mientras que en los provenientes de las pasturas de *B. humidicola* y *P. maximum* fue de 5.05 y 5.20, respectivamente, valores altamente relacionados a las dosis de cal aplicada.

El valor más bajo de pH (4.70) se encontró entre 0 y 20 cm de profundidad en suelos provenientes de la rotación arroz-caupí incorporado como abono verde. Según Ohwaki e Hirata (1992), las leguminosas responden de manera diferente en suelos deficientes de P, en términos de tasas de exudados y espectros de ácidos orgánicos liberados; por ejemplo, el garbanzo produce 11 y 24 veces más exudados que los liberados por guandul (*Cajanus cajan*) y la soya, respectivamente, mientras que el maní (*Arachis hypogaea*) produce 8 y 17 veces más que las especies anteriores. El exudado de altas concentraciones de aniones de los ácidos orgánicos por las raíces, como resultado de la deficiencia de P (Hoffland et al., 1989), reduce el pH en la rizosfera, por lo que el P (Haynes, 1990; Jones y Darrah, 1994) y micronutrientes como Mn, Fe y Zn tienden a ser más disponibles en suelos calcáreos (Dinkelaker et al., 1989). No obstante, las especies vegetales difieren en el manejo y la respuesta al exceso de Al en el suelo. Calba y Jaillard (1997) demostraron que un genotipo de maíz tolerante a la toxicidad por Al causó una menor acidificación en la rizosfera, debido a que la absorción de NO_3^- se afectó menos que en los genotipos sensibles a Al (Ohwaki e Hirata, 1992; Dakora et al., 2002).

En general, el Ca mostró una tendencia a aumentar según la profundidad en el suelo, presentando los mayores incrementos entre 0 y 10 cm en los sistemas provenientes arroz, con un aumento promedio de 30%. La mayor concentración de este elemento ocurrió en arroz monocultivo (0.75 cmol/kg), seguido de arroz-caupí para grano (0.62 cmol/kg).

En los sistemas provenientes de maíz, las concentraciones de Ca en el suelo tendieron a permanecer constantes (0.93 cmol/kg). En la sabana nativa se presentaron promedios bajos de Ca (0.30 cmol/kg).

Cuadro 1. Caracterización química del suelo inicial (1993) y final (1998–2001) en los sistemas basados en el cultivo de arroz. Ensayo Culticore, Carimagua, Llanos Orientales de Colombia.

Profundidad (cm)	Sistemas agropastoriles	P (mg/kg)		pH (Un)		Ca (cmol/kg)		Mg (cmol/kg)		K (cmol/kg)		Saturación Al (%)											
		Fase I	Fase II	Fase I	Fase II	Fase I	Fase II	Fase I	Fase II	Fase I	Fase II	Fase I	Fase II										
		1993	1998	1993	1998	1993	1998	1993	1998	1993	1998	1993	1998	1993	1998								
0–10	Arroz	1.58	10.4	8.50	2001	4.46	4.40	5.15	2001	0.23	0.49	0.75	0.10	0.24	0.37	2001	0.12	0.18	0.11	82.7	68.5	2001	61.2
	Arroz-caupí-grano	1.60	19.0	23.0	2001	4.43	4.20	4.80	2001	0.22	0.43	0.62	0.10	0.23	0.25	2001	0.13	0.23	0.34	84.1	68.9	2001	64.5
	Arroz-caupí-abono verde	1.81	27.3	33.0	2001	4.41	4.18	4.70	2001	0.24	0.44	0.46	0.11	0.23	0.15	2001	0.13	0.26	0.11	83.3	69.2	2001	76.2
	Sabana nativa	1.70	1.08	0.75	2001	4.58	4.68	4.95	2001	0.25	0.26	0.30	0.09	0.19	0.10	2001	0.14	0.07	0.06	83.3	79.7	2001	83.7
	<i>Bracharia humidicola</i>	1.56	3.77	1.00	2001	4.45	4.80	5.05	2001	0.24	0.48	0.57	0.10	0.32	0.23	2001	0.12	0.09	0.10	84.4	66.8	2001	72.0
	DMS _{0,05}	ns ^a	4.95	2.77	2001	0.10	0.10	0.16	2001	ns	0.14	0.27	ns	0.04	0.19	2001	ns	0.04	0.03	ns	7.34	2001	15.0
10–20	Arroz	0.91	1.62	1.50	2001	4.55	4.65	5.00	2001	0.15	0.24	0.47	0.05	0.17	0.20	2001	0.06	0.06	0.07	89.5	77.8	2001	76.7
	Arroz-caupí-grano	0.96	1.51	2.00	2001	4.48	4.60	4.90	2001	0.14	0.22	0.39	0.05	0.16	0.14	2001	0.06	0.07	0.11	90.1	77.5	2001	79.0
	Arroz-caupí-abono verde	1.13	2.38	12.0	2001	4.43	4.43	4.70	2001	0.15	0.31	0.39	0.06	0.19	0.13	2001	0.06	0.09	0.07	89.6	72.9	2001	80.3
	Sabana nativa	0.96	0.65	0.75	2001	4.59	4.80	4.95	2001	0.15	0.15	0.28	0.05	0.13	0.09	2001	0.06	0.04	0.05	90.2	84.9	2001	83.8
	<i>B. humidicola</i>	0.93	0.93	0.75	2001	4.51	4.87	5.10	2001	0.15	0.16	0.36	0.05	0.14	0.14	2001	0.06	0.04	0.07	89.4	83.3	2001	80.8
	DMS _{0,05}	ns	0.84	0.82	2001	ns	0.11	0.26	2001	ns	0.08	0.13	ns	0.01	0.04	2001	ns	0.02	0.01	ns	4.97	2001	6.60
20–40	Arroz	0.81	1.09	1.00	2001	4.69	4.70	5.20	2001	0.11	0.20	0.45	0.53	0.16	0.15	2001	0.04	0.04	0.05	82.7	73.5	2001	75.7
	Arroz-caupí-grano	1.21	8.17	1.00	2001	4.74	4.65	5.00	2001	0.10	0.21	0.36	0.04	0.15	0.12	2001	0.04	0.05	0.10	91.1	72.7	2001	77.5
	Arroz-caupí-abono verde	0.78	1.01	1.00	2001	4.63	4.55	5.00	2001	0.10	0.21	0.34	0.04	0.16	0.12	2001	0.04	0.06	0.05	90.7	73.1	2001	77.9
	Sabana nativa	0.76	0.58	0.75	2001	4.79	4.95	5.15	2001	0.10	0.12	0.46	0.04	0.12	0.19	2001	0.04	0.03	0.08	91.4	83.2	2001	72.1
	<i>B. humidicola</i>	0.68	0.93	0.75	2001	4.66	4.93	5.20	2001	0.11	0.11	0.32	0.04	0.12	0.11	2001	0.05	0.03	0.05	90.1	81.0	2001	81.0
	DMS _{0,05}	ns	ns	ns	2001	ns	0.15	ns	2001	ns	0.06	ns	ns	0.02	ns	2001	ns	0.01	ns	ns	5.33	2001	ns

a. ns = Diferencias no significativas.

P (Bray II, colorimetría); pH_(H2O) 1:1; Ca, Mg: intercambiables (KCl 1M, absorción atómica); K (Bray II, absorción atómica); saturación Al: (Al × 100)/(Al + Ca + Mg +K).

Cuadro 2. Caracterización química del suelo inicial (1994) y final (1998–2001) en los sistemas basados en el cultivo de maíz.. Ensayo Culticore. Carimagua, Llanos Orientales de Colombia.

Profundidad (cm)	Sistemas agropastoriles		P (mg/kg)		pH (Un)		Ca (cmol/kg)		Mg (cmol/kg)		K (cmol/kg)		Saturación Al (%)					
			Fase I	Fase II	Fase I	Fase II	Fase I	Fase II	Fase I	Fase II	Fase I	Fase II	Fase I	Fase II				
			1994	2001	1994	2001	1994	1998	1994	2001	1994	1998	1994	2001	1994	1998	2001	
0–10	Maíz	2.20	11.6	3.50	4.40	4.55	5.20	1.11	0.92	1.04	0.68	0.44	0.10	0.17	0.10	45.0	52.1	51.8
	Maíz-soya-grano	1.50	15.1	17.0	4.40	4.48	4.95	0.98	0.85	0.74	0.61	0.37	0.10	0.21	0.22	38.4	53.9	63.3
	Maíz-soya-abono verde	2.25	17.5	24.0	4.60	4.43	5.15	1.13	1.05	1.19	0.70	0.41	0.13	0.25	0.13	39.9	49.7	43.4
	Sabana nativa	1.71	1.78	1.00	4.53	4.70	5.00	0.42	0.37	0.32	0.22	0.26	0.08	0.07	0.08	77.0	76.3	83.3
	<i>Panicum maximum</i>	1.80	3.1	0.75	4.50	4.73	5.20	1.15	0.88	0.75	0.69	0.50	0.12	0.09	0.18	43.3	49.6	57.3
	DMS _{0,05}	ns ^a	10.3	18.8	ns	0.13	0.16	ns	0.36	0.63	ns	0.15	0.26	0.06	0.17	ns	13.4	26.2
10–20	Maíz	0.75	0.90	0.75	4.30	4.70	5.05	0.22	0.24	0.45	0.07	0.19	0.05	0.05	0.06	87.6	77.5	76.6
	Maíz-soya-grano	0.90	1.40	1.50	4.25	4.70	4.95	0.23	0.34	0.47	0.11	0.19	0.06	0.06	0.10	84.8	73.9	74.9
	Maíz-soya-abono verde	0.95	1.95	10.5	4.25	4.48	5.20	0.18	0.42	1.05	0.06	0.25	0.06	0.08	0.09	88.6	69.8	55.9
	Sabana nativa	1.00	0.95	0.75	4.50	4.78	5.00	0.20	0.15	0.28	0.09	0.15	0.05	0.04	0.06	89.2	85.0	86.3
	<i>P. maximum</i>	1.85	1.18	0.50	4.10	4.83	5.20	0.40	0.20	0.42	0.22	0.18	0.08	0.04	0.13	77.3	79.6	72.7
	DMS _{0,05}	ns	0.59	1.48	ns	0.09	0.16	ns	0.09	ns	ns	0.04	ns	ns	ns	ns	5.09	26.7
20–40	Maíz	1.00	0.70	0.75	4.55	4.65	5.15	0.17	0.15	0.35	0.04	0.15	0.04	0.03	0.06	87.5	77.9	71.8
	Maíz-soya-grano	0.95	0.88	1.50	4.30	4.70	5.10	0.17	0.19	0.42	0.06	0.14	0.04	0.04	0.08	88.9	76.1	76.6
	Maíz-soya-abono verde	0.85	1.15	0.75	4.50	4.48	5.15	0.14	0.22	0.51	0.05	0.17	0.04	0.05	0.06	90.1	75.5	73.5
	Sabana nativa	0.80	0.65	0.50	4.60	4.90	5.15	0.15	0.12	0.29	0.05	0.13	0.04	0.03	0.05	91.0	82.7	85.5
	<i>P. maximum</i>	1.15	1.05	0.50	4.45	4.83	5.15	0.15	0.13	0.34	0.05	0.16	0.04	0.03	0.06	89.8	78.6	76.5
	DMS _{0,05}	ns	ns	0.82	ns	0.69	ns	ns	0.05	0.11	ns	0.02	0.07	ns	ns	ns	2.88	12.0

a. ns = Diferencias no significativas.

P (Bray II, colorimetría); pH_(H2O) 1:1; Ca, Mg: intercambiables (KCl 1M, absorción atómica); K (Bray II, absorción atómica); saturación Al: (Al × 100)/(Al + Ca + Mg +K).

El contenido de Mg entre 0 y 10 cm de profundidad tendió a disminuir. Los valores fueron más altos en sistemas provenientes de maíz (0.37 cmol/kg) que de arroz (0.25 cmol/kg), siendo mayor la reducción (14%) en los provenientes de maíz, con excepción de los sistemas provenientes de maíz-soya, cuando la leguminosa se incorporó como abono verde, donde aumentó entre 0 y 20 cm de profundidad. Los sistemas provenientes de arroz y maíz monocultivo presentaron valores de Mg de 0.37 y 0.41 cmol/kg, respectivamente; la sabana nativa presentó un promedio de 0.21 cmol/kg.

La disponibilidad de Ca y Mg en Oxisoles y Ultisoles es afectada por prácticas de manejo como labranza, rotación de cultivos y aplicación de enmiendas o fertilizantes, al igual que por los niveles de la forma intercambiable, la capacidad de intercambio catiónico efectiva, el Al intercambiable, la textura y la mineralogía de las arcillas (Kamprath, 1971; Foy, 1976). Las concentraciones de ambos nutrientes en estos suelos son frecuentemente muy bajas. En Colombia, los rangos encontrados varían entre 0.06 y 0.40 cmol/kg en la superficie del suelo (Lopes y Cox, 1977; Sánchez 1977; Salinas, 1980). La baja capacidad de intercambio catiónico efectiva en la mayoría de Oxisoles y Ultisoles presenta tanto ventajas como desventajas para el suministro de Ca y Mg. Una de las desventajas es la rápida lixiviación durante períodos de lluvias intensas y las deficiencias durante la época seca.

El K presentó también tendencia a disminuir respecto al contenido de la Fase I, en todas las profundidades consideradas en sistemas provenientes de arroz y maíz, excepto entre 0 y 10 cm en el sistema arroz monocultivo y pastura de *P. maximum*, que presentaron valores de 0.34 y 0.18 cmol/kg respectivamente. La sabana nativa presentó una concentración promedio de 0.07 cmol/kg. Las reservas de K en estos suelos por lo general se encuentran por debajo de los niveles críticos (15 cmol kg) aceptados para cultivos.

La saturación de Al promedio a profundidad de 0 a 10 cm fue de 68.5 y 54.0% para los sistemas provenientes de arroz y maíz, respectivamente, mientras que a la profundidad de 10 a 40 fue de 78 y 72%, respectivamente. En general, la saturación de Al tendió a mantenerse, debido al efecto residual de los tratamientos establecidos durante la Fase I. La saturación más baja entre los sistemas provenientes de arroz se presentó en arroz monocultivo a todas las profundidades (0 a 40 cm) evaluadas, mientras que la más alta se obtuvo en arroz-caupí (incorporado como abono verde), de 0 a 10 cm, con 76%. En los sistemas provenientes de maíz, de 0 a 10 cm de profundidad, el valor más bajo (43.4%) lo presentó maíz-soya (incorporada como abono verde), y el más alto (63.3%) el sistema maíz-soya (producción de grano). La sabana nativa presentó un valor promedio de 82.5%.

Los resultados anteriores pueden ser explicados por el efecto residual de la cal, frecuentemente más corto en condiciones de trópico, debido principalmente a la incidencia de altas precipitaciones y temperaturas (Lathwell, 1979). Para reducir el efecto de la acidez en el suelo es posible aplicar cal en cantidades necesarias para neutralizar el efecto del Al, aplicar e incorporar Ca y Mg en el suelo y establecer especies de plantas y variedades tolerantes a toxicidades por Al y Mn (Sánchez y Salinas, 1981). El Al compite con el Ca por los sitios de

intercambio en la solución del suelo y la toxicidad por Al entonces disminuye por las adiciones de Ca (Millaway y Wiersholm, 1979).

Los Oxisoles y Ultisoles predominantes en los Llanos Orientales Colombia se caracterizan por el contenido de arcillas tipo 1:1, lo que significa una ventaja ya que requieren menos nivel de saturación de bases para la adecuada disponibilidad de Ca y Mg para las plantas (Kirkby, 1979).

La dinámica de los nutrientes en general en este tipo de sistemas de producción está dada por la historia de uso del suelo, incluidas las entradas al sistema por adición de insumos, las salidas del sistema por la extracción de nutrientes como productos y las prácticas de manejo, con especial énfasis en el tipo de labranza, enmarcado en las condiciones climáticas.

Características físicas de suelo

Fase I

Las características físicas evaluadas en la Fase I presentaron diferencias significativas ($P < 0.05$), principalmente para los sistemas basados en el cultivo de arroz de 0 a 10 cm de profundidad, excepto para conductividad hidráulica saturada.

El efecto deletéreo de los monocultivos se observó principalmente en la distribución de los valores de porosidad total en el cultivo de arroz. Tanto el sistema arroz monocultivo como la sabana nativa presentaron los valores más altos de microporos (no se presentan los resultados), indicando mayor compactación y menor aireación del suelo. El sistema arroz monocultivo presentó también los mayores valores de susceptibilidad a la compactación, inclusive con valores por encima de los niveles críticos (87%), enfatizando que el sistema presenta limitantes físicas para el adecuado desarrollo de las plantas. El sistema maíz-soya, cuando la leguminosa se incorporó como abono verde, presentó mayor porosidad total, mayor conductividad hidráulica saturada y mayor contenido de macroporos, condiciones en general favorables para la producción agrícola (Amézquita et al., 1997; Spain et al., 2007).

La pastura *P. maximum* presentó en profundidad menor susceptibilidad a compactación, condición que se ve reflejada posteriormente en mayor rendimiento de cultivos provenientes de este sistema. En general, las pasturas tanto de *B. humidicola* como de *P. maximum* presentaron los mayores valores de resistencia a la penetración en superficie, probablemente debido al manejo del pastoreo realizado en estos sistemas. En los sistemas basados en arroz, la resistencia tendió a aumentar con valores en superficie (0–10 cm) entre 15 y 20 kgf/cm², y en profundidad, en promedio, 40 kgf, con restricciones, dado que el nivel crítico es 27 kgf/cm².

Fase II

Los Cuadros 3 y 4 presentan los efectos de la labranza y de los sistemas de producción basados en los cultivos de arroz y/o maíz y de su interacción para los parámetros físicos evaluados en los sistemas en rotación arroz-soya y maíz-soya.

Para la densidad aparente evaluada en los sistemas arroz-soya, se detectaron efectos significativos únicamente para labranza de 10 a 20 cm de profundidad. No se observaron efectos entre los sistemas de producción ni para la interacción labranza por sistemas. Las pasturas de *P. maximum* y de *B. humidicola* presentaron los valores más bajos de densidad aparente, tanto bajo labranza mínima (provenientes de maíz) como en siembra directa (provenientes de arroz), mientras que la sabana nativa presentó los valores más altos de densidad aparente en los sistemas bajo siembra directa (Figura 1A).

Para la densidad aparente evaluada en los sistemas maíz-soya, se detectaron efectos significativos para labranza a profundidades de 10 a 20 y 20 a 40 cm, mientras que para los sistemas de producción solo se detectaron efectos significativos para la profundidad de 0 a 10 cm. Las pasturas presentaron los menores valores de densidad aparente, tanto en labranza mínima como en siembra directa, y en los sistemas provenientes de arroz y maíz la sabana nativa presentó los mayores valores de densidad aparente, tanto en siembra directa como en labranza mínima (Figura 1B).

Debido a la alta correlación (negativa) entre densidad aparente y porosidad total, los efectos detectados, tanto para labranza como para sistemas de producción en los sistemas basados en arroz y maíz para densidad aparente, corresponden a los detectados para porosidad total. Los valores más bajos de porosidad total de 10 a 20 cm se presentaron en arroz-caupí (producción de grano) y los más altos para *B. humidicola*, tanto en labranza cero como en labranza mínima, y los más bajos maíz-soya para producción de grano.

La susceptibilidad a la compactación presentó efectos significativos para los sistemas provenientes de arroz a todas las profundidades evaluadas; entre sistemas solo se detectaron efectos significativos a la profundidad de 10 a 20 cm; no se presentaron efectos para interacción labranza por sistemas de producción. Los sistemas provenientes de maíz no presentaron efectos entre labranza, sistemas de producción, ni para la interacción. El sistema arroz-soya manejado con labranza mínima, proveniente de *B. humidicola*, presentó los mayores valores promedio, mientras que para la rotación maíz-soya los presentó arroz monocultivo y arroz-caupí (producción grano). Los sistemas de arroz y maíz manejados con siembra directa, presentaron mayores valores que los manejados con labranza mínima, destacándose la sabana nativa, con los valores más altos a la profundidad de 10–20 cm.

Cuadro 3. Efecto de los sistemas agropastoriles (basados en arroz), en las características físicas del suelo manejado con siembra directa y labranza mínima. Ensayo Culticore, Fase II, Carimagua, Llanos Orientales de Colombia.

Parámetro (Arroz-soya)	Profundidad (cm)	Promedio total	Nivel de significancia		
			Labranza	Sistemas	L × S ^a
Densidad aparente (g/cm ³)	0–10	1.22	0.228	0.542	0.391
	10–20	1.23	0.025	0.300	0.478
	20–40	1.23	1.000	0.943	0.135
Porosidad total (%)	0–10	53.8	0.234	0.550	0.380
	10–20	53.3	0.024	0.322	0.463
	20–40	53.4	0.996	0.951	0.119
Susceptibilidad a compactación (%)	0–10	88.2	0.001	0.909	0.768
	10–20	89.0	0.001	0.030	0.074
	20–40	90.2	0.047	0.923	0.764
Conductividad hidráulica saturada (cm/d)	0–10	41.1	0.081	0.082	0.789
	10–20	15.7	0.291	0.106	0.121
	20–40	12.2	0.310	0.441	0.308
Macroporos (%)	0–10	15.7	0.438	0.801	0.256
	10–20	15.5	0.007	0.262	0.376
	20–40	16.9	0.648	0.848	0.132
Mesoporos (%)	0–10	8.8	0.050	0.163	0.853
	10–20	9.4	0.540	0.042	0.949
	20–40	9.7	0.716	0.007	0.827
Microporos (%)	0–10	29.4	0.328	0.363	0.163
	10–20	28.5	0.044	0.007	0.221
	20–40	26.7	0.038	0.029	0.301
Humedad a capacidad de campo (%)	0–10	38.1	0.565	0.777	0.215
	10–20	37.8	0.004	0.376	0.323
	20–40	36.4	0.270	0.171	0.344
Humedad de campo (%)	0–10	16.2	0.005	0.001	0.619
	10–20	14.5	0.158	0.027	0.848
	20–40	13.3	0.038	0.013	0.951

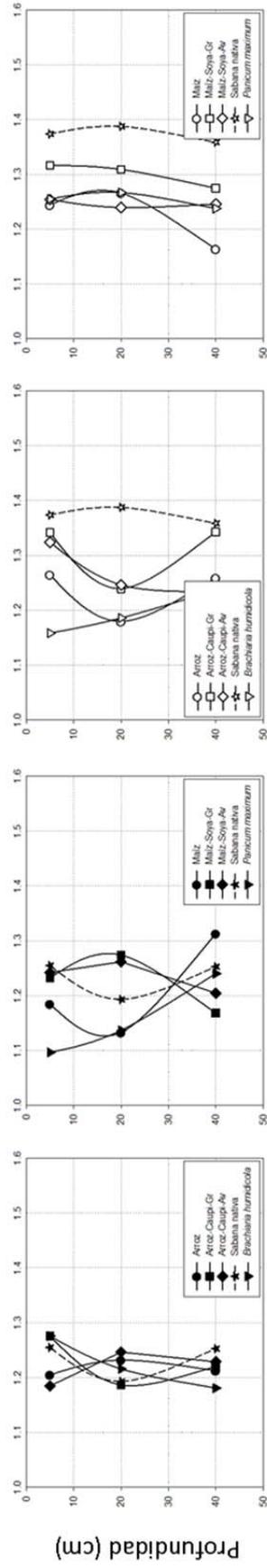
a. L = labranza; S = sistemas.

Cuadro 4. Efecto de los sistemas agropastoriles (basados en maíz), en las características físicas del suelo manejado con siembra directa y labranza mínima. Ensayo Culticore, Fase II, Carimagua, Llanos Orientales de Colombia.

Parámetro (Maíz-soya)	Profundidad (cm)	Promedio total	Nivel de significancia		
			Labranza	Sistemas	L × S ^a
Densidad aparente (g/cm ³)	0–10	1.26	0.904	0.044	0.183
	10–20	1.25	0.004	0.162	0.405
	20–40	1.22	0.013	0.278	0.788
Porosidad total (%)	0–10	52.4	0.906	0.050	0.186
	10–20	52.8	0.004	0.167	0.419
	20–40	53.7	0.015	0.279	0.785
Susceptibilidad a compactación (%)	0–10	88.7	0.065	0.696	0.431
	10–20	90.5	0.920	0.848	0.790
	20–40	90.9	0.369	0.350	0.583
Conductividad hidráulica saturada (cm/d)	0–10	25.6	0.081	0.146	0.611
	10–20	6.2	0.624	0.552	0.934
	20–40	6.3	0.509	0.174	0.776
Macroporos (%)	0–10	13.7	0.995	0.072	0.134
	10–20	14.8	0.021	0.314	0.449
	20–40	16.8	0.272	0.781	0.279
Mesoporos (%)	0–10	8.8	0.202	0.012	0.684
	10–20	9.3	0.038	0.005	0.880
	20–40	9.8	0.876	0.098	0.941
Microporos (%)	0–10	29.8	0.321	0.041	0.127
	10–20	28.7	0.035	0.121	0.410
	20–40	27.2	0.984	0.708	0.216
Humedad a capacidad de campo (%)	0–10	38.7	0.821	0.110	0.133
	10–20	38.0	0.296	0.658	0.486
	20–40	37.0	0.972	0.791	0.125
Humedad de campo (%)	0–10	15.7	0.012	0.016	0.507
	10–20	14.9	0.032	0.0004	0.872
	20–40	13.5	0.818	0.331	0.214

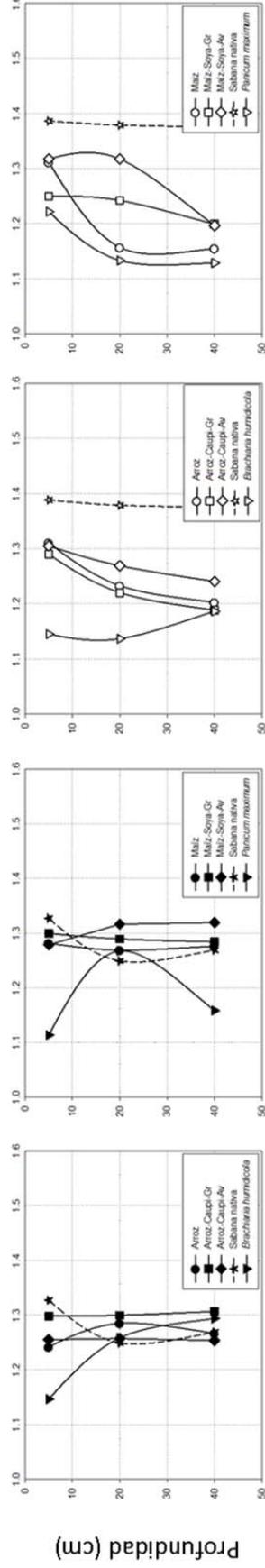
a. L = labranza; S = sistemas.

Densidad aparente (g cm^{-3})



a) Rotación Arroz -Soya

Densidad aparente (g cm^{-3})



b) Rotación Maíz -Soya

Figura 1. Efectos de la labranza (símbolos negros = labranza mínima; símbolos blancos = labranza cero) en la Fase II y los sistemas de producción (Fase I) en la densidad aparente en rotación. Ensayo Culticore, Carimagua, Llanos Orientales de Colombia.

Los macroporos ($>60 \mu\text{m}$), donde ocurre el movimiento del aire y el drenaje del exceso de agua, son los más afectados por el uso del suelo (Greenland, 1979); presentaron efectos significativos únicamente para labranza a la profundidad de 10–20 cm, tanto para los sistemas provenientes de arroz como de maíz. No se presentaron efectos para sistemas ni para la interacción labranza por sistemas. En los sistemas basados en arroz tanto en siembra directa como en labranza mínima, la sabana nativa presentó los menores valores de macroporos de 10 a 20 cm. Los mayores valores de macroporos se observaron en el sistema proveniente de la pastura de *B. humidicola*, en ambos tipos de labranza. En los sistemas basados en maíz a la misma profundidad, los mayores valores se presentaron en el sistema proveniente de maíz-soya (incorporada como abono verde), y en labranza mínima los menores valores se encontraron en maíz monocultivo.

La distribución de mesoporos, equivalente también al agua disponible para las plantas, presentó efectos significativos en los sistemas provenientes de arroz y maíz, tanto para labranza como para sistemas de producción, aunque a diferentes profundidades. En los sistemas provenientes de arroz, los efectos entre labranzas se presentaron de 0 a 10 cm de profundidad y entre sistemas a la profundidad de 10 a 40 cm, mientras que en los sistemas provenientes de maíz los efectos entre labranzas se observaron a la profundidad de 10–20 cm, y entre sistemas los efectos se presentaron de 0 a 20 cm de profundidad. La siembra directa presentó mayores valores comparada con labranza mínima, probablemente debido a mayor contenido de humedad a capacidad de campo. Los menores valores los presentó arroz monocultivo, manejado en labranza mínima en el sistema maíz-soya, ocasionado por un incremento en la cantidad de microporos.

En la distribución de microporos en los sistemas provenientes de arroz se observaron efectos significativos entre labranza y sistemas de producción a las profundidades de 10 a 40 cm, mientras que en los sistemas provenientes de maíz solo se observaron efectos entre labranza de 10 a 20 cm de profundidad. Los mayores valores se presentaron en sabana nativa, manejada con labranza mínima en los sistemas de arroz-soya y maíz-soya. Una de las causas del aumento de microporos en sistemas de producción está relacionada con el tipo de labranza. Los menores valores se presentaron en los sistemas arroz-soya y maíz-soya, provenientes de *P. maximum*. El entendimiento de los cambios en el tiempo de las propiedades fundamentales de suelo (físicas-químicas y biológicas) es importante para mejorar o diseñar sistemas de producción sostenibles en suelos de baja fertilidad (Amézquita et al., 2002).

Rendimiento de cultivos

Los rendimientos de grano de arroz y de maíz provenientes de los tratamientos basados en arroz fueron menores que los provenientes de los sistemas basados en maíz, probablemente debido a la condición de acidez más favorable para los cultivos y al efecto residual de las aplicaciones de cal dolomita durante la Fase I.

La siembra directa presentó mayor rendimiento de grano de arroz comparada con labranza mínima, en los sistemas basados en arroz y maíz con incrementos de 16 y 21%, respectivamente, en tanto que los rendimientos de grano de maíz no presentaron diferencias entre labranzas en los sistemas provenientes de arroz; los sistemas provenientes de maíz presentaron 10% de más rendimiento bajo siembra directa.

Rendimiento de arroz

En el 2000, los efectos entre labranzas y sistemas de producción fueron significativos para rendimiento, tanto en los sistemas provenientes de arroz como de maíz. En el 2001, el efecto de labranza solo se observó en los sistemas provenientes de maíz y entre sistemas de producción provenientes de arroz (Cuadro 5).

En los sistemas provenientes de arroz (T1 a T5), el rendimiento de arroz varió entre 3629 y 1646 kg/ha, correspondiente a los sistemas provenientes de la pastura de *B. humidicola* y sabana nativa, respectivamente, mientras que en los sistemas provenientes de maíz (T6 a T10), el rendimiento de arroz varió entre 3829 y 1822 kg/ha, correspondiente a los sistemas provenientes de la pastura *P. maximum* y sabana nativa, respectivamente. En general, los rendimientos promedio de arroz paddy, tanto en los sistemas provenientes de arroz como de maíz, fueron más altos en siembra directa que en labranza mínima, aunque mantuvieron la tendencia a disminuir en el segundo año. El orden en rendimiento de los sistemas de producción fue:

Pasturas > Rotación (abono verde) > Rotación (grano) > Monocultivos > Sabana nativa

Cuadro 5. Efecto de los sistemas de producción basados en los cultivos de arroz (T1 a T5) y de maíz (T6 a T10) en labranza cero (siembra directa) y labranza mínima (cincel) en el rendimiento de maíz y arroz. Ensayo Culticore, Fase II, Carimagua, Llanos Orientales de Colombia.

Sistemas (Fase I)	Cultivo (Fase II)	Año	Rendimiento promedio (kg/ha)	Nivel de significancia		
				Labranza	Sistemas	L × S ^a
Arroz (T1 a T5)	Arroz	2000	2410	0.0002	<0.0001	0.589
		2001	2209	0.0571	0.0002	0.131
	Maíz	2000	2724	0.0020	<0.0001	0.101
		2001	3241	0.0007	0.0004	0.587
Maíz (T6 a T10)	Arroz	2000	2783	0.0120	0.0014	0.776
		2001	2242	0.0010	0.1102	0.979
	Maíz	2000	3218	<0.0001	<0.0001	0.017
		2001	3453	0.0142	<0.0001	0.486

a. L = labranza; S = sistemas.

Rendimiento de maíz

Los efectos entre labranza y sistemas de producción fueron significativos para rendimiento en los 2 años evaluados, tanto para los sistemas provenientes de arroz como de maíz. No se detectaron efectos para la interacción entre labranza por sistemas de producción, excepto para producción de maíz proveniente de maíz en el año 2000 (Cuadro 6).

En los sistemas provenientes de arroz (T1 a T5), los máximos rendimientos durante el primer año se presentaron en los sistemas arroz-caupí, grano y en la pastura de *B. humidicola* (3700 kg/ha). En el segundo año, los rendimientos en labranza mínima en los sistemas en rotación con caupí-grano y caupí-abono verde fueron de 4352 y 4097 kg/ha, respectivamente, y en arroz monocultivo fue de 4077 kg/ha, y los mínimos rendimientos fueron para sabana nativa, (2122 kg/ha).

En los sistemas provenientes de maíz (T6 a T9), los máximos rendimientos se alcanzaron en la rotación maíz-soya incorporada como abono verde (4705 kg/ha) en el 2000 bajo siembra directa, y en siembra directa y labranza mínima en el 2001 (4030 y 4353 kg/ha), respectivamente. La pastura de *P. maximum* presentó también altos rendimientos, tanto en siembra directa como en labranza mínima (4239 y 4117 kg/ha), respectivamente. Bajo siembra directa se observó una disminución de los rendimientos en el segundo año, mientras que con labranza mínima la tendencia fue a incrementar. El orden de los sistemas de producción para rendimiento de maíz fue:

$$Pm > \text{Maíz-soya (abono verde)} > \text{Maíz-soya (grano)} > \text{Maíz} > \text{Sabana nativa}$$

Cuadro 6. Efecto de los sistemas de producción basados en los cultivos de arroz (T1 a T5) y de maíz (T6 a T10) en labranza cero (siembra directa) y labranza mínima (cincel) en el rendimiento de soya. Ensayo Culticore, Fase II, Carimagua, Llanos Orientales de Colombia.

Sistemas (Fase I)	Cultivo Soya	Año	Rendimiento promedio (kg/ha)	Nivel de significancia		
				Labranza	Sistemas	L × S ^a
Arroz (T1 a T5)	Arroz-soya	2000	998	0.992	0.0016	0.532
		2001	1380	0.903	0.0619	0.989
	Maíz-soya	2000	1130	0.173	<0.0001	0.258
		2001	1198	0.356	<0.0001	0.078
Maíz (T6 a T10)	Arroz-soya	2000	1533	0.421	<0.0001	0.201
		2001	1619	0.033	0.161	0.904
	Maíz-soya	2000	1734	0.229	0.0002	0.410
		2001	1643	0.480	0.0003	0.814

a. L = labranza; S = sistemas.

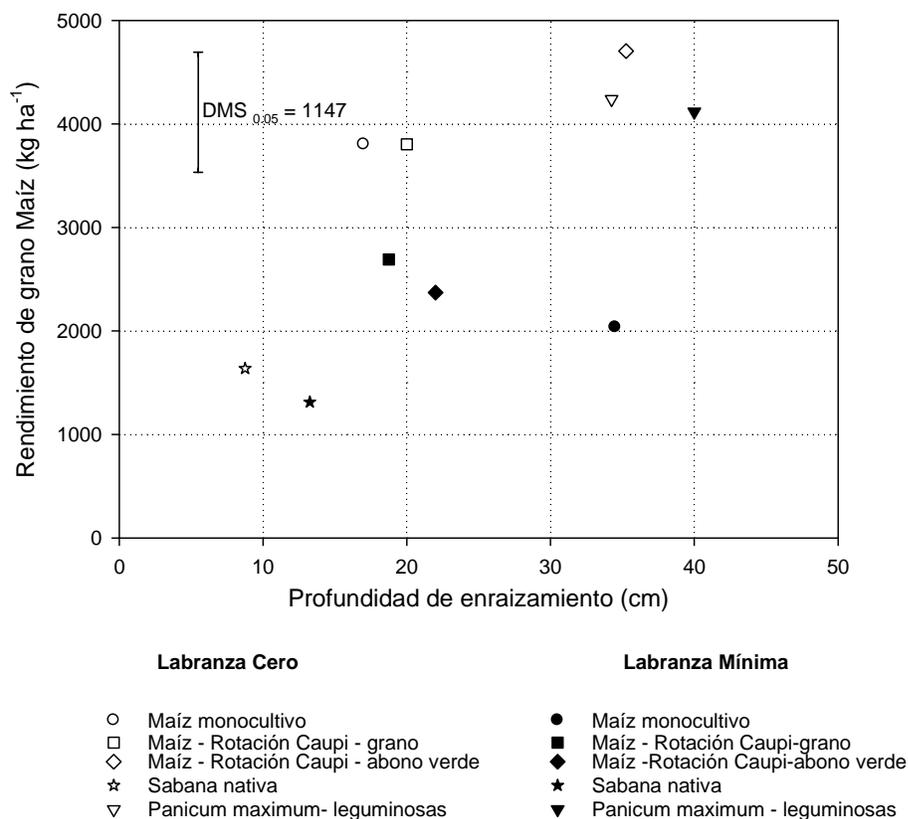


Figura 2. Efectos de la labranza y profundidad de enraizamiento en rendimiento de grano de maíz (2001). Ensayo Culticore, Fase II, Carimagua, Llanos Orientales de Colombia.

Los altos rendimientos en la rotación con soya incorporada como abono verde pudo atribuirse al mayor nivel de nutrientes como P, debido al aumento del P disponible y del N debido a la fijación biológica (CIAT, 1995).

Los mayores rendimientos de grano estuvieron asociados con mayor longitud de raíces, lo cual implica mayor área de exploración de las raíces para obtención de agua y nutrientes (Figura 2), mientras que la máxima longitud de raíces desarrolladas en maíz en la sabana nativa en condiciones naturales fue de 10 cm. El subsuelo de la mayoría de Oxisoles es usualmente bastante ácido, y a menudo presenta una barrera química para el desarrollo de raíces, debido a la toxicidad por Al o a la deficiencia extrema de Ca o a ambas condiciones (Sánchez y Salinas, 1981).

Rendimiento de soya

En la rotación arroz-soya, los efectos de labranza para rendimiento de grano fueron significativos solamente para los sistemas provenientes de maíz en el 2001, mientras que el efecto para sistemas de producción fue significativo para rendimiento de grano en el 2000

(Cuadro 7). En el 2001, año en que se detectaron diferencias entre labranza para rendimiento de soya en rotación con arroz, en sistemas provenientes de maíz, se produjo mayor rendimiento en labranza mínima (1429 kg/ha) que en siembra directa (1251 kg/ha). Los mayores rendimientos en labranza mínima se presentaron en maíz monocultivo (1621 kg/ha), seguido del sistema maíz-soya incorporada como abono verde (1459 kg/ha).

En la rotación maíz-soya, para producción de grano se presentaron efectos altamente significativos entre sistemas de producción, tanto en los sistemas provenientes de maíz como de arroz (Cuadro 7).

En los tratamientos correspondientes a la rotación maíz-soya se presentaron mayores rendimientos de grano de soya con valores promedio de 1741 kg/ha, que en la rotación arroz-soya, con valores promedio de 1293 kg/ha, equivalente a 35% más rendimiento de grano. Los mayores rendimientos se presentaron en los sistemas provenientes de monocultivo, seguidos de la rotación con soya (incorporada como abono verde y para producción de grano) y de la pastura, probablemente efecto residual de la fertilización en la Fase I, la cal dolomita aplicada y los residuos aplicados (Cuadro 8).

La literatura reporta que los rendimientos a menudo son menores con no-labranza comparados con labranza mínima (Dickey et al., 1994), aunque otros investigadores han encontrado lo contrario (Wilhelm et al., 1987). Mientras los rendimientos de arroz y maíz fueron en general afectados por el tipo de labranza, los rendimientos de soya no lo fueron.

Sin embargo, Brown et al. (1989) encontraron efecto de la no-labranza en rendimiento de soya en el sureste de Iowa, Estados Unidos. Las diferentes respuestas de los cultivos de arroz, maíz y soya a la labranza pueden ser causadas por las fechas de siembra de soya (primeros días de septiembre) respecto a los cultivos de arroz y de maíz (primeros días de mayo), situación que podría tener efecto en cambios en condiciones del suelo (Wilhelm y Wortmann, 2004).

Cuadro 7. Efecto de los sistemas de producción basados en los cultivos de arroz (T1 a T5) y de maíz (T6 a T10) en labranza cero (siembra directa) y labranza mínima (cincel) en los rendimientos de maíz y arroz. Ensayo Culticore, Fase II, Carimagua, Llanos Orientales de Colombia.

Sistemas de producción	2000		2001	
	Siembra directa	Labranza mínima	Siembra directa	Labranza mínima
Rendimiento arroz (kg/ha)				
Arroz	2831	1908	2250	2062
Arroz-caupí-grano	2536	2278	2368	1905
Arroz-caupí-abono verde	2390	1953	2648	2947
Sabana nativa	2197	1458	2232	2084
<i>Brachiaria humidicola</i>	3611	2933	2099	1499
SED ^a	158	115	113	108
Maíz	2933	2252	2618	1787
Maíz-soya-grano	2822	2636	2609	2013
Maíz-soya-abono verde	3306	2429	2818	2138
Sabana nativa	2171	1822	3343	2088
<i>Panicum maximum</i>	3829	3378	2220	1846
SED	230	124	206	124
Rendimiento maíz (kg/ha)				
Arroz	3288	3217	3125	4077
Arroz-caupí-grano	3708	2225	3095	4352
Arroz-caupí-abono verde	3473	1958	3194	4097
Sabana nativa	1277	1153	2122	2492
<i>B. humidicola</i>	3702	3242	2720	3138
SED	183	246	124	253
Maíz	3802	2035	3191	3594
Maíz-soya-grano	3803	2691	3183	4014
Maíz-soya-abono verde	4705	2370	4030	4353
Sabana nativa	1638	1313	2166	1775
<i>P. maximum</i>	4239	4117	2853	3583
SED	242	142	114	163

a. SED = Error estándar de la diferencia de medias.

Cuadro 8. Efecto de los sistemas de producción basados en los cultivos de arroz (T1 a T5) y de maíz (T6 a T10) en labranza cero (siembra directa) y labranza mínima (cincel) en los rendimientos de soya. Ensayo Culticore, Fase II, Carimagua, Llanos Orientales de Colombia.

Sistemas de producción	2000		2001	
	Siembra directa	Labranza mínima	Siembra directa	Labranza mínima
Soya (kg/ha) en rotación con arroz				
Arroz	950	1136	1754	1705
Arroz-caupí-grano	1068	1089	1391	1405
Arroz-caupí-abono verde	1207	1055	1473	1380
Sabana nativa	703	795	1065	1162
<i>Brachiaria humidicola</i>	1186	1045	1371	1318
SED ^a	87.7	82.0	120.6	164.0
Soya (kg/ha) en rotación con maíz				
Maíz	1372	1326	1552	1621
Maíz-soya-grano	1290	1057	964	1336
Maíz-soya-abono verde	1376	979	1079	1459
Sabana nativa	847	878	970	861
<i>Panicum maximum</i>	1366	1348	1408	1299
SED	94.8	65.8	119.1	155.6
Soya (kg/ha) en rotación con arroz				
Arroz	1662	1579	1600	1610
Arroz-caupí-grano	2093	1674	1603	1547
Arroz-caupí-abono verde	1655	1839	1750	1723
Sabana nativa	827	844	943	1452
<i>B. humidicola</i>	1464	1523	1825	1902
SED	70.0	92.3	77.8	95.5
Soya (kg/ha) en rotación con maíz				
Maíz	1789	1714	1920	1917
Maíz-soya-grano	2049	1565	1904	1660
Maíz-soya-abono verde	2136	2018	2037	1687
Sabana nativa	1076	1076	688	674
<i>P. maximum</i>	1630	1696	1461	1465
SED	76.7	101.8	125.9	112.1

a. SED = Error estándar de la diferencia de medias.

Conclusiones

- Cinco años después de establecidos los sistemas de producción de la Fase I del Ensayo Culticore, se observaron cambios en las principales características del suelo, que se reflejaron en los rendimientos de los cultivos en la Fase II, especialmente en los sistemas provenientes de maíz, comparado con sabana nativa.
- Los sistemas de producción basados en el cultivo de maíz en la Fase I presentaron los mayores rendimientos cuando se cultivaron posteriormente en la Fase II en los sistemas arroz-soya o maíz-soya, debido a las mejores condiciones para el establecimiento de cultivos.
- En general, las mejores condiciones para el desarrollo y rendimiento de cultivos de la Fase II se presentaron en el siguiente orden:

Panicum maximun > Rotaciones (incorporación como abono verde) >
Rotaciones (producción de grano).

- Se observó una alta relación entre rendimientos de cultivos y profundidad de enraizamiento, lo que estaría indicando la contribución de los sistemas evaluados en el mejoramiento de las condiciones físicas y químicas de estos suelos de baja fertilidad natural.

Referencias

- Álvarez A; Lascano CE. 1987. Valor nutritivo de la sabana bien drenada en los Llanos Orientales de Colombia. *Pasturas Tropicales* 9(3):9–17.
- Amézquita E; Sanz JI; Thomas RJ; Vera RR; Hoyos P; Molina DL; Chávez LF. 1997. Características estructurales de los suelos de los Llanos Orientales de Colombia sometidos a varios sistemas de manejo. *Revista Suelos Ecuatoriales* 27:151–156.
- Amézquita E; Friesen D; Rivera M; Rao IM; Barrios E; Jiménez JJ; Decaëns T; Thomas RJ. 2002. Sustainability of crop rotation and ley pasture systems on the acid-soil savannas of South America. En: *Proceedings of the 17th World Congress of Soil Science, Bangkok, Tailandia, 14–21 agosto 2002*.
- Benavides J. 2010. El desarrollo económico de la Orinoquia, como aprendizaje y construcción de instituciones. *Debates Presidenciales*. CAF-Fedesarrollo. 40 p.
- Brady NC; Weil RR. 2002. Global soil quality as affected by human activities. En: Brady NC; Weil RR. *The nature and properties of soils*. 13a. ed. Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ, Estados Unidos. p 871–902.

- Brown HJ; Cruse RM; Colvin TS. 1989. Tillage system effects on crop growth and production costs for corn-soybean rotation. *Journal of Production Agriculture* 2:273–279.
- Calba H; Jaillard B. 1997. Effect of aluminium on ion uptake and H⁺ release by maize. *New Phytologist* 137:607–616.
- Chen X-P; Cui Z-L; Vitousek PM; Cassman KG; Matson PA; Bai J-S; Meng Q-F; Hou P; Yue S-C; Römheld V; Zhang F-S. 2011. Integrated soil-crop system management for food security. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 108(16): 6399–6404.
- CIAT (Centro Internacional de Agricultura Tropical). 1995. Tropical Lowlands Program. Annual Report 1994. Working Document No. 148. Cali, Colombia. p 258.
- Cole MM. 1986. The savannas: Biogeography and geobotany. Academic Press, Londres, Reino Unido. 438 p.
- Cook JR. 2006. Toward cropping systems that enhanced productivity and sustainability. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 103:18389–18394.
- Dakora F D; Joseph CM; Phillips DA. 2002. Root exudates as mediators of mineral acquisition in low-nutrient. *Plant and Soil* 245:35–47.
- Decaëns T; Lavelle P; Jiménez JJ; Escobar G; Rippstein G; Schneidmadl J; Sanz JI; Hoyos P; Thomas RJ. 2001. Impact of land management on soil macrofauna in the Eastern Plains of Colombia. En: Jiménez JJ; Thomas RJ, eds. *Nature's plow: Soil macroinvertebrate communities in the neotropical savannas of Colombia*. Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), Cali, Colombia. p 19–41.
- Dickey EC; Jasa PJ; Grisso RD. 1994. Long term tillage effects on grain yield and soil properties in soybean/grain sorghum rotation. *Journal of Production Agriculture* 7:465–470.
- Dinkelaker B; Römheld V; Marschner H. 1989. Citric acid excretion and precipitation of calcium citrate in the rhizosphere of white lupin (*Lupinus albus* L). *Plant, Cell & Environment* 12(3):285–292.
- Foy CD. 1976. The Physiology of plant adaptation to mineral En: Wright MJ, ed. *Plant adaptation to mineral stress in problem soils*. Proceedings of a workshop, Beltsville, MD, November 22–23, 1976. Cornell University Agricultural Experiment Station; New York State College of Agriculture and Life Sciences, Ithaca, NY, Estados Unidos. p 255–268.
- Friesen DK; Rao IM; Oberson A; Sanz JI. 1997. Phosphorus acquisition and cycling in crop and pasture systems in low fertility tropical soils. *Plant and Soil* 196:289–294.
- Friesen D; Thomas R; Rivera M; Asakawa N; Bowen W. 1998. Nitrogen dynamics under monocultures and crop rotations on a Colombian savanna Oxisol. En: *Proceedings of the 16th World Congress of Soil Science on CD-ROM*. Association française pour l'étude du sol, Montpellier, Francia.

- Godfray HCJ. 2011. Food for thought: How feed the world in 2050. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 108:19845–19846.
- Greenland DJ. 1979. Structural organization of soil and crop production. En: Greenland DJ; Lal R, eds. *Soil physical conditions and crop production in the tropics*. John Wiley & Sons, Chichester, Reino Unido. p 45–57.
- Guimarães EP; Sanz JI; Rao IM; Amézquita E. 2004. Research on agropastoral systems: What we have learned and what we should do. En: Guimarães EP; Sanz JI; Rao IM; Amézquita MC; Amézquita E; Thomas RJ, eds. *Agropastoral systems for the tropical savannas of Latin America*. Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), Cali, Colombia; Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa), Brasília, DF, Brasil. p 326–336.
- Haynes RJ. 1990. Active ion uptake and maintenance of cation-anion balance: A critical examination of their role in regulating rhizosphere pH. *Plant and Soil* 126(2):247–264.
- Hoffland E; Findenegg GR; Nelemans JA. 1989. Solubilization of rock phosphate by rape. II. Local root exudation of organic acids as a response to P-starvation. *Plant and Soil* 113(2):161–165.
- Jiménez JJ; Rossi JP; Lavelle P. 2001. Spatial distribution of earthworms in acid-soil savannas of the Eastern Plains of Colombia. En: Jiménez JJ; Thomas RJ, eds. *Nature's plow: Soil macroinvertebrate communities in the neotropical savannas of Colombia*. Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), Cali, Colombia. p 104–120.
- Jones DL; Darrah PR. 1994. Role of root derived organic acids in the mobilization of nutrients from the rhizosphere. *Plant and Soil* 166:247–257.
- Kamprath EJ. 1971. Potential detrimental effects from liming highly weathered soils to neutrality. *Soil Science Society of Florida, Proceedings* 31:201–203.
- Kirkby EA. 1979. Maximizing calcium uptake by plants. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 10(1–2):89–113.
- Lathwell DJ. 1979. Crop response to liming of Ultisols and Oxisols. *Cornell International Agricultural Bulletin* 35. New York College of Agriculture and Life Sciences, Ithaca, NY, Estados Unidos. 36 p.
- Lopes AS; Cox FR. 1977. Cerrado vegetation: An edaphic gradient. *Agronomy Journal* 69:828–831.
- Millaway RM; Wiersholm L. 1979. Calcium and metabolic disorders. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 10(1–2):1–28.
- Ohwaki Y; Hirata H. 1992. Differences in carboxylic acid exudation among P-starved leguminous crops in relation to carboxylic acid contents in plant tissues and phospholipid level in roots. *Soil Science and Plant Nutrition* 38(2):235–243.

- Rao IM; Friesen DK; Osaki M. 1999. Plant adaptation to phosphorus-limited tropical soils. En: Pessaraki M, ed. Handbook of plant and crop stress. Marcel Dekker, Inc., Nueva York, Estados Unidos. p 61–96.
- Rippstein G; Escobar G; Motta F, eds. 2001. Agroecología y biodiversidad de las sabanas en los Llanos Orientales de Colombia. Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), Cali, Colombia. 302 p.
- Rivera M. 2003. Caracterización de sistemas en monocultivo y en rotación y su evaluación con el Modelo CERES-Crop en Oxisoles de los Llanos Orientales de Colombia. Tesis (M.Sc.). Ciencias Agrícolas, Universidad Nacional de Colombia, Sede Palmira. 135 p.
- Salinas JG. 1980. Soil adaptation and nutrient requirement of various stylosanthes. En: Silva M, F, ed. Fertilidad de suelos: Diagnóstico y control. Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo, Bogotá, Colombia. p 339–420.
- Sánchez P, C. 1977. Encalamiento de Ultisoles de sabana. Universidad de Oriente, Jusepín, Venezuela. 95 p.
- Sánchez PA; Salinas JG. 1981. Low-input technology for managing Oxisols and Ultisols in tropical America. *Advances in Agronomy* 34:279–406.
- SAS Institute Inc. 1999. SAS/STAT User's Guide, Version 8. Cary, NC, Estados Unidos.
- Soil Survey Staff. 1994. Keys to soil taxonomy. Pocahontas Press, Blacksburg, VA, Estados Unidos.
- Spain JM. 1993. General comments related to rapid rural surveys, Cerrados. Crop-pasture integration. CIAT internal document. Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), Cali, Colombia.
- Spain JM; Amézquita E; Rao I; Ayarza M; Barrios E; Rondón M. 2007. Improving productivity and sustainability of crop-livestock systems in tropical savannas of South America. ASA-CSSA-SSSA, 2007 International Annual Meetings, Nov 4–8, Nueva Orleans, LA, Estados Unidos.
- Stanger TF; Laurer JG. 2008. Corn grain response to crop rotation and nitrogen over 35 years. *Agronomy Journal* 100(3):643–650.
- Tilman D; Balzer C; Hill J; Befort B.L. 2011. Global food demand and the sustainable intensification of agriculture. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 108(50):20260–20264.
- Vanotti MB; Bundy LY. 1994. An alternative rationale for corn nitrogen fertilizer recommendations. *Journal of Production Agriculture* 7:243–249.
- Vera RR; Seré R, C, eds. 1985. Sistemas de producción pecuaria extensiva: Brasil, Colombia, Venezuela. Informe Proyecto ETES – Estudio técnico y económico de sistemas de producción pecuaria 1978–1982. Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), Cali, Colombia. 520 p.

- West PC; Gibbs HK; Monfreda C; Wagner J; Barford CC; Carpenter SR; Foley JA. 2010. Trading carbon for food: Global comparison of carbon stocks vs. crop yields on agricultural land. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 107(46):19645–19648.
- Wilhelm W; Wortmann CH. 2004. Tillage and rotation interactions for corn and soybean grain yield as affected by precipitation and air temperature. *Agronomy Journal* 96:425–432.
- Wilhelm WW; Schepers JS; Mielke LN; Doran JW; Ellis JR; Stroup WW. 1987. Dryland maize development and yield resulting from tillage and nitrogen fertilization practices. *Soil & Tillage Research* 10:167–179.

Adquisición y Reciclaje de Fósforo en Sistemas de Cultivos y Pasturas en Suelos Tropicales de Baja Fertilidad¹

D. K. Friesen², I. M. Rao³, R. J. Thomas⁴, A. Oberson⁵ y J. I. Sanz⁶

Resumen

Los procesos suelo-planta que mejoran la adquisición y el reciclaje de P en Oxisoles con bajo P, fueron investigados en sistemas agropastoriles en los Llanos Orientales de Colombia. La comparación de los patrones de enraizamiento indicó que, a pesar de la baja disponibilidad de P en profundidad, existen importantes diferencias en la cantidad y distribución de las raíces entre la sabana nativa, las pasturas introducidas y las especies de cultivos, lo que afecta su capacidad para adquirir P de estos suelos. Las diferencias en la descomposición de los residuos de cultivos/forrajes y en la tasa de liberación de P indican que el manejo de la interacción de los residuos con el suelo puede ayudar a disminuir las reacciones de fijación de P. A pesar de las anteriores diferencias, las mediciones de fraccionamiento de P indicaron que el P aplicado se mueve preferencialmente en las fuentes “Pools” lábiles de P inorgánico, y luego lentamente, a través de la producción de biomasa y microorganismos se mueven dentro de las fuentes “Pools” orgánicas de P tanto para los sistemas de pasturas como de rotación de cultivos.

Palabras claves: descomposición de hojarasca, Oxisoles, fraccionamiento de fósforo, distribución de raíces, longitud de raíces, sabanas tropicales

-
1. Este documento es una traducción al español del publicado por Springer y Kluwer Academic Publishers / Plant and Soil, Vol. 196, 1997, páginas 289–294, Phosphorus acquisition and cycling in crop and pasture systems in low fertility tropical soils, D. K. Friesen, I. M. Rao, R. J. Thomas, A. Oberson, J. I. Sanz, figuras 1-4, © 1997 Kluwer Academic Publishers. Con el permiso de Springer Science y Business Media.
 2. Química de suelos/Agronomía, Consultor Internacional, Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo (CIMMYT), Addis Ababa, Etiopía. d.friesen@cgiar.org
 3. Fisiología y Nutrición de plantas, Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), Cali, Colombia. i.rao@cgiar.org
 4. United Nations University, International Network on Water, Environment and Health (UNU-INWEH), Hamilton, Ontario, Canadá. contact@inweh.unu.edu
 5. Química de suelos/Nutrición de plantas, ETH-Zürich, Institute of Agricultural Sciences, Lindau, Suiza. astrid.oberson@usys.ethz.ch
 6. Suelos/Agronomía, Centro de Investigación en Palma de Aceite (Cenipalma), Bogotá, Colombia. jsanz@cenipalma.org

Introducción

Los suelos tropicales altamente meteorizados (Oxisoles, Ultisoles) se caracterizan por niveles bajos de P total y disponible y por la alta capacidad de fijación de P. Las entradas de P son esenciales para aumentar y sostener la producción agrícola, aunque a menudo son inaccesibles o poco rentables para los agricultores de escasos recursos. Además, el P aplicado al suelo entra en reacciones que gradualmente hacen que no esté disponible para los cultivos. La adquisición de P por las plantas rara vez excede el 20% del total de fertilizante de P aplicado; la posibilidad de mejorar la eficiencia de P es inmensa. La clave está en aumentar la recuperación de P a partir de las formas menos accesibles mediante cultivos y cultivares forrajeros que tomen de manera más eficiente el P, e integrar estos cultivares eficientes en la toma de P a los sistemas de producción de cultivos/pasturas con mayor eficiencia en el reciclaje de P aplicado.

Durante los últimos 20 años se han identificado cultivos tropicales y germoplasma forrajero adaptados a bajos niveles de P de los suelos (Pellet y El-Sharkawy, 1993; Rao et al., 1993; Lynch y Beebe, 1995), pero las características de las plantas y los mecanismos que contribuyen a una mayor adquisición de P y/o utilización en estos genotipos son poco conocidos. Los sistemas podrían beneficiarse de una mayor adquisición de P mediante el mejoramiento del reciclaje de P de los residuos. Siguiendo el concepto de "sincronización" de la liberación de nutrientes y la demanda de los cultivos en los sistemas (Swift, 1984), el reciclaje de P se podría mejorar mediante la interceptación de P liberado de los residuos, antes de que se mueva dentro de fuentes "Pools" menos disponibles.

El entendimiento y comprensión de los procesos de reciclaje nos permitiría diseñar sistemas e intervenciones de manejo que minimicen los flujos indeseables de P fuera del ciclo (a través de reacciones de "fijación") y maximizar los flujos de P directos a fuentes "Pools" dinámicas a las que tengan acceso las raíces de las plantas y las micorrizas. Nuestra hipótesis es que los cultivos y cultivares de forrajes que son más eficientes para la extracción de P podrían ser capaces de absorber P de la solución del suelo en concentraciones mucho más bajas, así como movilizar menos formas de P disponibles y reciclar el P adquirido de componentes menos eficientes en sistemas de cultivo.

En este capítulo se presentan resultados que demuestran tanto las diferencias en las estrategias de enraizamiento entre cultivos y especies forrajeras y en su capacidad para adquirir P en Oxisoles infértiles, como las diferencias en la liberación de P de los residuos derivados de este germoplasma. Asimismo, se analizan las diferencias en la dinámica y el reciclaje de P entre fuentes "Pools" orgánicas e inorgánicas en sistemas de producción contrastantes en Oxisoles infértiles de los Llanos Orientales de Colombia.

Materiales y métodos

Los estudios se realizaron en la Estación Experimental CIAT-Corpoica, Carimagua (4° 37' N, 71° 19' O y 175 m.s.n.m.), en los Llanos Orientales de Colombia, con una temperatura promedio anual de 27 °C y una precipitación promedio anual de 2240 mm, que cae principalmente desde finales de marzo hasta mediados de diciembre. Los suelos son Oxisoles bien drenados franco arcillosos (Tropeptic Haplustox Isohipertérmicos).

Las mediciones se realizaron en tratamientos seleccionados de un ensayo establecido en 1993 para investigar la sostenibilidad en sistemas agropastoriles para las sabanas de suelos ácidos (ver Capítulo 4 de ésta publicación). Se compararon los sistemas de producción basados en los cultivos de arroz y/o maíz con respecto a sus efectos sobre el reciclaje de nutrientes, almacenamiento de carbono, pérdida de materia orgánica del suelo, y la condición física del suelo

Además de los monocultivos, los componentes del sistema en rotación con arroz y maíz fueron las leguminosas (caupí-soya), respectivamente, para producción de grano y/o la incorporación como abono verde (AV), y las pasturas mejoradas de *Brachiaria humidicola* CIAT 679 + *Arachis pintoii* CIAT 17434 + *Stylosanthes capitata* CIAT 10280 + *Centrosema acutifolium* CIAT 5277 (*Bh*-leguminosas); o *Panicum maximum* CIAT 6871 cv. Centenario + *A. pintoii* + *Pueraria phaseoloides* CIAT 9900, Kudzu (*Pm*-leguminosas). Para las comparaciones de referencia, las parcelas de sabana nativa (SN) se mantuvieron en su condición natural. Se aplicó el fertilizante superfosfato triple a las dosis de 60, 80, 40 y 40 P kg/ha a los cultivos de arroz, maíz, leguminosas de grano y AV, respectivamente. En las pasturas sembradas después del establecimiento de los cultivos de arroz y maíz, además de la aplicación de P inicial, se realizaron aplicaciones bianuales de mantenimiento con dosis de 20 P kg/ha. Los otros nutrientes se aplicaron a niveles adecuados (basados en el contenido del suelo y el requerimiento de las plantas). La distribución de la longitud de las raíces (0–80 cm de profundidad) se estimó en el monocultivo de maíz en julio de 1994 (durante el llenado de grano), y en SN y en la pastura (*Bh*-leguminosas) en noviembre de 1994 (1.5 años después del establecimiento).

El método de extracción de muestras consistió en la recolección de 10 muestras en núcleos de suelo en el área de las raíces por cada parcela, agrupadas por profundidad. Se lavaron las muestras hasta que las raíces quedaron libres de suelo, se analizó su longitud, se secaron y se pesaron (Rao et al., 1997a; Vepraskas y Hoyt, 1988). Se determinó el P disponible por el método de Bray II (Olsen y Sommers, 1982), así como los cationes intercambiables y el Al (Thomas, 1982) en las submuestras de los núcleos de suelo usados para la extracción de raíces. Se calculó la diferencia en la distribución vertical de la longitud de la raíz entre tratamientos usando el modelo de Gale y Grigal (1987), $Y = 1 - \beta^d$, donde Y es la fracción de la longitud de raíz acumulada (entre 0 y 1), desde la superficie del suelo hasta la profundidad d (cm), y β (único parámetro estimado) es el índice de distribución de longitud de raíces. Los

valores más altos de β corresponden a mayores proporciones de longitud de la raíz a profundidad.

Se calculó la adquisición de P a partir de la biomasa total (base peso seco), medida a partir de marcos cosechados, junto con la concentración de P determinado en submuestras de grano de maíz molido y seco y en los residuos de la parte aérea de la planta en época de madurez; la biomasa aérea, tanto en la SN como en la pastura de *Bh*-leguminosas se muestrearon sobre el área utilizada para el muestreo de raíces. Se realizó solo un muestreo (final de la estación lluviosa) para la evaluación de las pasturas. Se evaluó la descomposición de los residuos de los cultivos, los AV y la hojarasca de los forrajes en muestras recolectadas de las parcelas de campo, y se estudió mediante las técnicas estándar de bolsas de descomposición de residuos (Thomas y Asakawa, 1993). Se colocaron bolsas de nailon con un contenido de 10 g de peso seco de los diferentes materiales de plantas, sobre la superficie del suelo y cubiertas con material vegetal similar al encontrado en cada parcela; o se enterraron a 5 cm de profundidad en cada tratamiento. Las bolsas de hojarasca estaban dispuestas en 3 a 4 series repetidas de seis bolsas cada una. En cada fecha de muestreo, una de las muestras de cada serie de material vegetal se lavó, se secó y se analizó para la determinación de la materia seca y el contenido de nutrientes (Thomas y Asakawa, 1993). La tasa de descomposición y la vida media de cada uno de los materiales vegetales se calcularon usando el modelo de descomposición exponencial, $X = X_0 \times \exp(-kt)$, donde X es la cantidad relativa de materia seca o P restante, X_0 es la cantidad inicial, k es la constante para la tasa de descomposición o liberación, y t es el tiempo. La dinámica y la distribución del P en las fuentes orgánicas e inorgánicas se estudiaron en los sistemas de producción arroz monocultivo, arroz-AV, pastura de *Bh* + leguminosas y en la SN.

Para el muestreo de suelos se tomaron aleatoriamente muestras compuestas de 0 a 10 cm de profundidad, provenientes de 10 núcleos de 8 cm de diámetro por parcela, dos veces por semana desde marzo de 1995 hasta marzo de 1996 o en fechas de interés previamente seleccionadas; se secaron al aire, se tamizaron y se fraccionaron parcialmente (fuentes "Pools" lábiles de P solamente), de acuerdo con el procedimiento establecido por Hedley modificado (Tiessen y Moir, 1993). Este procedimiento intenta cuantificar las formas cada vez más lábiles o estables de P inorgánico (P_i) y P orgánico (P_o) mediante la aplicación de extractantes cada vez más fuertes: H_2O con resina de intercambio aniónico, $NaHCO_3$ 0.5 M (Bic-P), $NaOH$ 0.1 M, HCl 1.0 M y HCl concentrado y caliente (HCl_{hc}). El P residual en el suelo restante se determinó por digestión con ácido perclórico.

Resultados

Adquisición de P por los cultivos y forrajes

La longitud de raíz por unidad de área de superficie del suelo disminuyó con el incremento de la profundidad del suelo (Figuras 1A, 1B y 1C). Alrededor del 75% de la longitud de las raíces

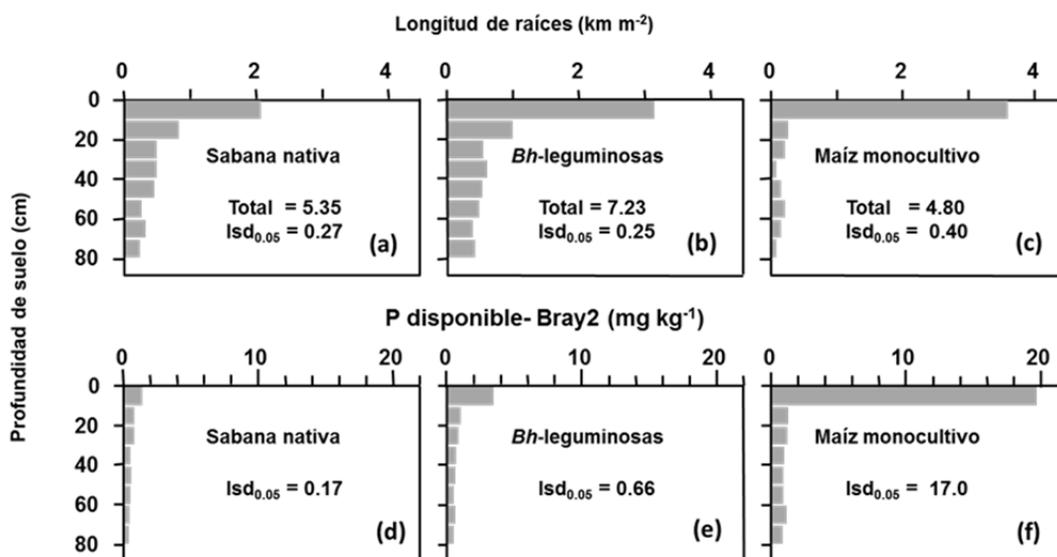


Figura 1. Distribución de la longitud de la raíz (A, B, C) por profundidad del suelo en relación con el P disponible, Bray II (D, E, F) en un Oxisol arcilloso limoso en sabana nativa, pastura *Brachiaria humidicola* (*Bh*)-leguminosas y monocultivo de maíz.

del maíz se encontró en la parte superior (0–10 cm de profundidad) del horizonte del suelo, mientras que para la SN y la pastura de *Bh*-leguminosas se presentaron el 38 y el 42% de su longitud total de la raíces, respectivamente, en este horizonte de suelo. Los promedios de las fracciones acumuladas de longitud de raíces y valores β -estimados (Figura 2) confirmaron que la SN y la pastura de *Bh*-leguminosas tuvieron una mayor proporción de raíces en profundidad (es decir, las raíces fueron más profundas) que en el cultivo de maíz. Además de la longitud total de la raíz (Figura 1), la biomasa de las raíces de la SN, la pastura de *Bh*-leguminosas (475 y 954 kg/ha), respectivamente, fueron mayores a la biomasa de raíces del cultivo de maíz (453 kg/ha). La distribución de las raíces en el perfil del suelo estuvo relacionada con la baja disponibilidad de P (Figuras 1D, 1E y 1F) y, en particular, para el maíz, el cual está menos adaptado que la SN y las especies de pasturas introducidas, a la alta saturación de Al intercambiable (86–92%) en los horizontes del subsuelo. Las raíces del maíz proliferaron en el horizonte superficial del suelo, donde la aplicación de cal redujo los niveles tóxicos de Al a cerca del 46% de saturación. (La saturación de Al en la superficie del suelo en la SN y la pastura de *Bh*-leguminosas fue de 90 y 77%, respectivamente.) La absorción de P total en la biomasa aérea de la pastura de *Bh*-leguminosas fue similar a la del maíz (14 vs. 18 P kg/ha, respectivamente), a pesar de un nivel mucho más bajo de P disponible en la superficie del suelo (3.5 vs. 19.8 P mg/kg). La absorción de P de la SN fue mucho menor (4 P kg/ha).

Liberación de P de residuos de cultivos y hojarasca de forrajes

La tasa de descomposición de los residuos del cultivo de arroz, el caupí, los AV, la pastura de *B. humidicola* y la leguminosa forrajera *S. capitata*, distribuidos en la superficie del suelo, se relacionaron con su proporción C:N, pero fueron tanto mayores como menores a las tasas

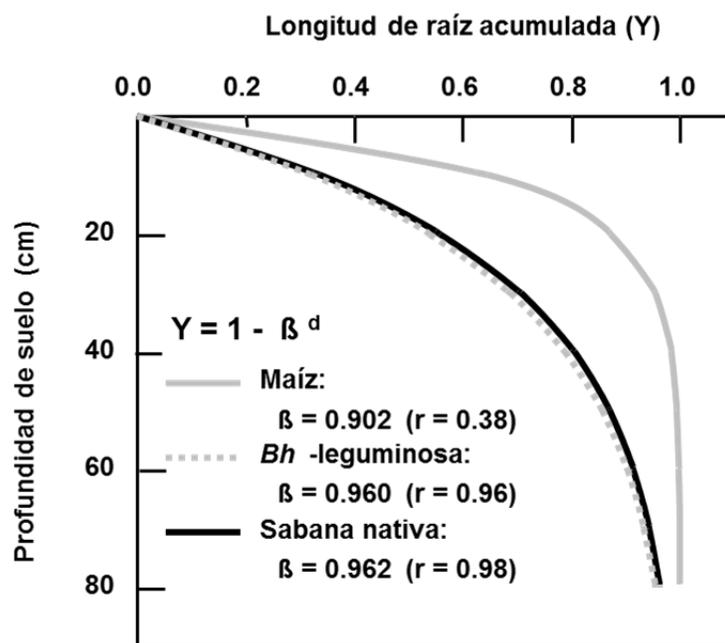


Figura 2. Distribución vertical de la longitud de la raíz (fracción acumulada entre 0 y 1) para la sabana nativa, pastura *Brachiaria humudicola* (*Bh*)-leguminosa y maíz monocultivo, en función de la profundidad del suelo, donde β es el coeficiente de distribución. (Véase el texto para la definición del modelo y los parámetros.)

aparentes de liberación de P (Figura 3). Si bien esto sugiere una posible inmovilización de P en el último caso, las relaciones C:N y C:P de los AV no sustentan esta interpretación. Otros factores controladores de estos procesos, aún no identificados, pueden haber sido responsables de la mayor estabilidad aparente de P en los residuos del AV. Sin embargo, la cantidad real de P liberado de los residuos de los AV fue mucho mayor a la liberada del arroz, la pastura, o los residuos de la leguminosa, debido principalmente a las mayores concentraciones iniciales de P (Figura 3). La vida media de las leguminosas incorporadas como AV y la leguminosa forrajera fueron en general más cortas que la presentada para los residuos de la pastura o el arroz. La mezcla de hojarasca de forrajes con diferentes tasas de descomposición (de los pastos y la leguminosa) no resultó en ningún efecto sinérgico o inhibitorio sobre la descomposición o liberación de nutrientes; las tasas de las mezclas de material vegetal fueron iguales a la tasa promedio de los componentes individuales (datos no presentados). En los residuos enterrados en el suelo se estimuló notablemente la descomposición y liberación de nutrientes. La tasa de descomposición de caupí (AV), por ejemplo, fue incrementada más de dos veces, y la vida media se redujo de 63 a 14 días. El efecto sobre los residuos de arroz fue menos dramático con reducción de la vida media de 64 a 37 días. Las tasas de liberación de P aumentaron de manera similar por incorporación.

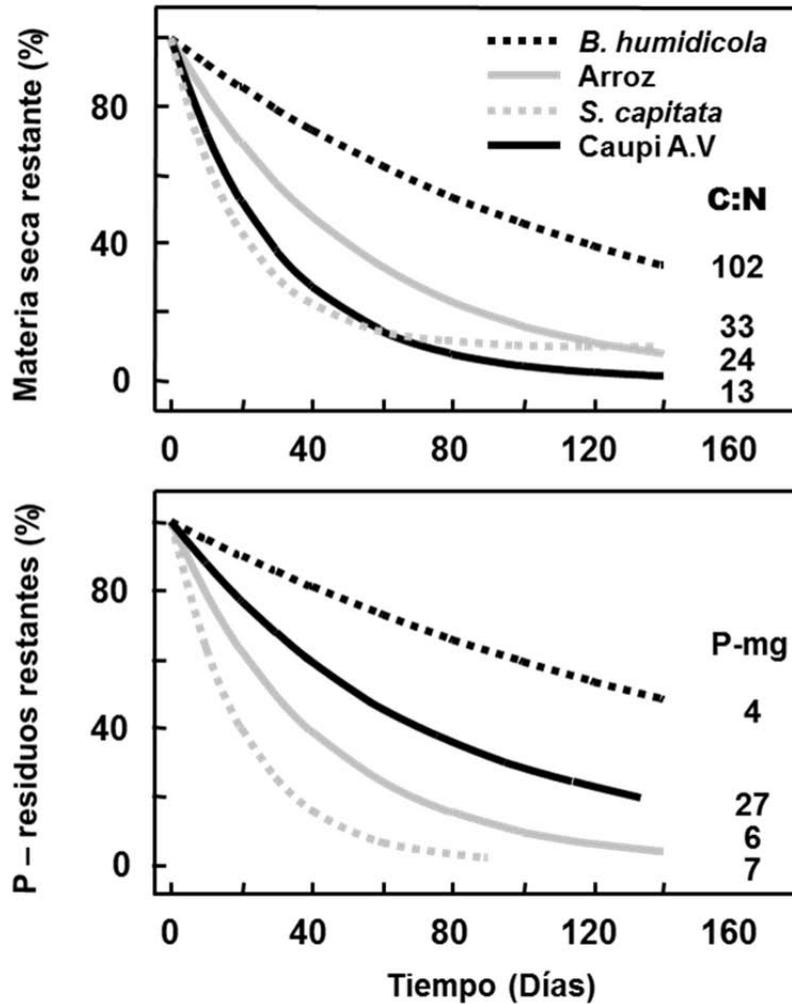


Figura 3. Cantidades relativas de materia seca y P remanente en los residuos de *Brachiaria humidicola*, arroz, *Stylosanthes capitata*, caupí y abono verde durante la incubación de las bolsas de descomposición colocadas en la superficie del suelo. Las curvas están ajustadas en funciones exponenciales de descomposición (ver texto); los valores en las figuras son relaciones C:N inicial y el contenido de P de los residuos.

Reciclaje de P en sistemas de producción contrastante

En general, las fracciones lábiles (Pi-resina, Pi-Bic y Pi-NaOH) en todos los sistemas fueron las más sensibles a la aplicación de fertilizantes fosfatados (Figura 4). Las fracciones de Po fueron en general estables durante todo el año, con variaciones significativas ocurridas solamente en el monocultivo de arroz, y los sistemas de arroz en rotación con caupí (AV) en forma de pulsos cortos en concentraciones Po-Bic. El primero, seguido de un pulso en las fuentes inorgánicas, Pi debido a la fertilización en abril, y el segundo, seguido de la incorporación de AV en octubre (ambos correspondientes a un ligero y simultáneo descenso en Pi-Bic). Las concentraciones de Po-NaOH se movieron en un rango estrecho durante el año y no se observaron diferencias significativas en la dinámica de P a corto plazo entre los sistemas. En general, los efectos de los sistemas en la distribución de las fracciones de P durante los primeros 3 años siguieron

tendencias similares a las dinámicas estacionales con más P aplicado, fluyendo dentro las fracciones lábiles de Pi (Cuadro 1). Las únicas fuentes “Pools” lábiles de Po afectadas significativamente fueron las extraídas por NaOH. También fue significativo y comparativamente menor el movimiento de P dentro de las formas más recalcitrantes extraídas por reacciones con ácidos fuertes (en particular, HCl_{hc} , así como Pt-residual). En términos relativos (porcentaje de P total) se observaron incrementos en Pi-resina, Pi-Bic y fracciones de Pi-NaOH, mientras que Po-NaOH y Pt-residual disminuyeron en relación con el sistema de SN.

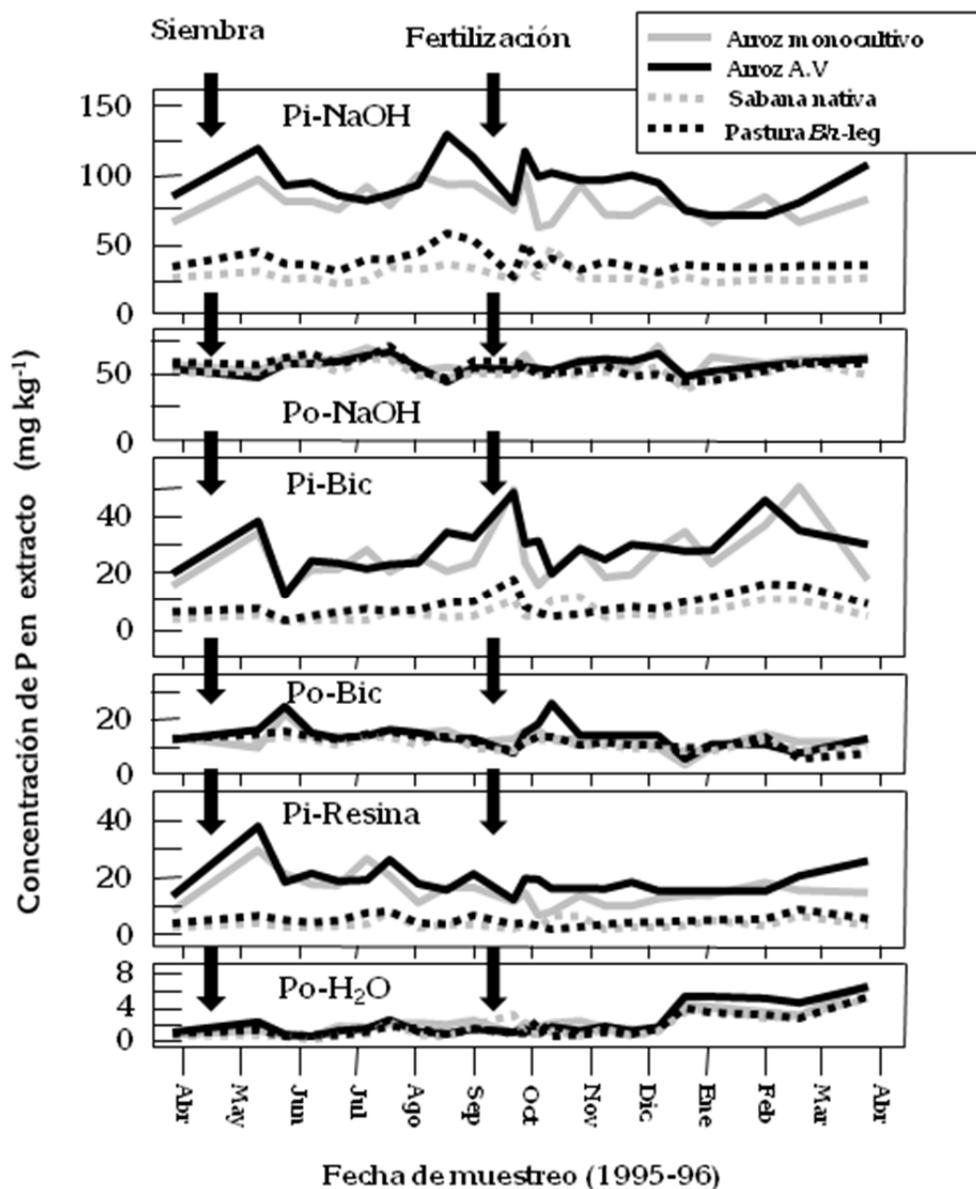


Figura 4. Dinámica de P durante un año (marzo 1995–marzo 1996) en las fracciones lábiles orgánicas e inorgánicas (definidas por el procedimiento Hedley modificado) bajo cuatro sistemas de producción, incluyendo la sabana nativa. Las flechas indican fecha de siembra y aplicación de los fertilizantes a los cultivos.

Cuadro 1. Distribución de P en varias fracciones en diferentes sistemas de producción con y sin aplicación de P en un Oxisol franco arcilloso 3 años después del establecimiento de la sabana nativa en Carimagua.

Sistema de producción ^a	H ₂ O-resina		Bicarbonato		NaOH		HCl 1M	HCl _{hc}		P	
	Pi	Po	Pi	Po	Pi	Po	Pi	Pi	Po	Residual	Total
P (mg/kg de suelo)											
SN	4b	4	6b	8b	20b	44b	0	33b	7	54c	181b
Bh-leg.	4b	3	11bc	9ab	33b	43b	1	40b	9	59ab	212b
Arroz monoc.	13a ^b	4	23ab	9ab	65a	60a	1	49a	9	56bc	289a
Arroz-AV	14a	5	27a	10a	70a	49ab	4	51a	8	62a	300a
P total (%)											
SN	2b	2	3c	4a	11b	24a	0	18	4a	30a	100
Bh-leg.	2b	1	5bc	4a	16b	20ab	1	19	4a	28a	100
Arroz monoc.	4a	1	8ab	3b	22a	21ab	0	17	3b	20b	100
Arroz-AV	5a	2	9a	3b	23a	16b	1	17	3b	21b	100

a. SN = sabana nativa; Bh-leg. = *Brachiaria humidicola*-leguminosa; AV = abono verde; monoc. = monocultivo.

b. Valores dentro una columna seguidos de la misma letra (o sin letra) no presentan diferencias significativas ($P < 0.05$), según la prueba de Duncan.

Discusión

El suelo como fuente, las raíces, la biomasa, la hojarasca/residuos y el suelo como sumidero son los componentes principales a través de los cuales el P y otros nutrientes realizan su ciclo en ecosistemas naturales y agrícolas. Los procesos y las interacciones entre estos componentes determinan la eficiencia del ciclo de P o la pérdida. La adquisición de P por las plantas depende del tamaño y la distribución del sistema radicular, de la cinética de absorción de P y de la capacidad de movilización de P (Barber, 1984).

Mientras el enraizamiento profundo es ventajoso para la recuperación de los nutrientes que se mueven en profundidad en el suelo, el P se concentra en general en la capa superficial del suelo y es muy inmóvil en suelos tropicales altamente meteorizados. En consecuencia, un cultivo de raíces poco profundas con una mayor densidad de longitud de la raíz puede ser más eficiente en la recuperación de P. El crecimiento y la distribución de la raíz de maíz en el presente estudio disminuyó en las capas inferiores de suelo por baja disponibilidad de P y toxicidad elevada por Al, a pesar de que esta variedad (Sikuani 3) estaba aparentemente adaptada a suelos muy ácidos (Pandey et al., 1994). A pesar de tener una menor proporción de raíces en la capa superficial, el tamaño total de raíces del sistema de forrajes, en comparación con el maíz, permitió a la pastura explorar un volumen mucho mayor de suelo, en particular los horizontes del subsuelo. Por consiguiente, la absorción de P en la pastura de *Bh*-leguminosas

(subestimado, ya que se basó en un único muestreo de biomasa de la pastura, sin considerar el consumo animal o la senescencia del tejido del forraje) fue 4–5 veces mayor que en maíz, en relación con el contenido de P disponible en la superficie del suelo (3.1 vs. 0.70 de P kg/ha, Bray II).

El crecimiento sustancialmente mayor de las raíces de la pastura de *Bh*-leguminosas en las capas inferiores de suelo en condiciones ácidas con bajos niveles de P, refleja la mayor capacidad de los forrajes para movilizar y tomar P del suelo (Rao et al., 1997b). El P adquirido de los residuos de cultivos y hojarasca del forraje vuelve a entrar al ciclo cuando los residuos son descompuestos en el suelo. Dado que la pérdida de P de los sistemas de producción se produce principalmente a través de los procesos en el suelo, una importante herramienta de manejo para incrementar el reciclaje de P sería reducir al mínimo la interacción del P con el suelo. La calidad y el manejo de residuos es un componente clave de esta estrategia.

Hemos visto en el presente estudio las diferencias considerables en la descomposición y las tasas de liberación de P entre los distintos tipos de residuos/hojarasca, como era de esperar dada su composición inicial diferente en términos de concentración de N%, P% y la cantidad de lignina (Thomas y Asakawa, 1993). Las diferencias en las tasas de liberación puede ser de menor importancia en las pasturas donde las raíces activas están siempre presentes para recuperar el P liberado de la hojarasca en descomposición. En los sistemas que involucran cultivos, sin embargo, el sistema radicular del cultivo no puede ser suficientemente desarrollado para recuperar el P liberado de los residuos del cultivo anterior. Para el arroz, el patrón de liberación de P de los residuos aplicados a la superficie sugiere que <60% estará disponible para el siguiente cultivo de caupí (o componentes alternativos) en un sistema de rotación. Para el monocultivo de arroz, la liberación completa dentro de los 4 meses implica una interacción sin restricciones con el suelo de alrededor de 6 meses antes que el próximo cultivo presente un sistema radicular suficientemente desarrollado para adquirirlo. Claramente, la incorporación de residuos agravará el problema mediante la estimulación de la descomposición a través de incrementos del contacto entre suelo-microorganismos-hojarasca. El P mantenido en las fuentes “Pools” orgánicas puede estar mejor protegido de las pérdidas a través de la fijación de P que fluye a través de fuentes “Pools” inorgánicas en el suelo.

El P entra a las fuentes orgánicas por asimilación de los cultivos y la posterior descomposición derivada de los residuos y las raíces, o por medio de inmovilización por los microorganismos del suelo. Así, se espera que los sistemas que adquieren más P y producen más residuos tengan más influencia de las fuentes “Pools” de P_o del suelo. En este estudio hay algunas evidencias de inmovilización de P_i en la fracción P_o -Bic después de la fertilización, así como pulsos de P_o dentro de la fracción P_o -Bic, los cuales coincidieron con la senescencia de la raíz a cosecha y la incorporación de AV. Sin embargo, todos los flujos dentro de fracciones P_o fueron muy transitorios, sugiriendo que las fuentes que ellos representan son todas altamente lábiles. De hecho, los cambios relativos en los tamaños de la fuente “Pool” observados en el curso de este estudio sugieren que P fluyó preferentemente dentro de las fuentes “Pools” P_i lábiles y luego más lentamente dentro de las fuentes “Pools” P_o . Estas

observaciones difieren de las encontradas anteriormente en un experimento de pastoreo de 16 años de establecido, en un área adyacente en la cual el estado del P, proveniente de la fertilización de una pastura de *B. decumbens* CIAT 606/Kudzu, se comparó con el obtenido en la SN (CIAT, 1995). Como se explicó anteriormente, tanto las fracciones de Pi-NaOH y de Po, así como Pi-HCl_{hc}, fueron sumideros significativos de los fertilizantes fosfatados aplicados para el mejoramiento de la pastura. Sin embargo, en términos relativos, la partición del P aplicado en el suelo bajo pastura *B. decumbens* fue similar a la distribución de P en el suelo de la SN en condición natural. Esto sugiere que, a largo plazo (en este caso, 16 vs. 3 años), el P puede ser redistribuido de las fuentes "Pools" inorgánicas lábiles a fuentes inorgánicas menos lábiles a través de los procesos de reciclaje (Rao et al., 1997a). Las plantas forrajeras con sistemas de raíces grandes y eficientes deben desempeñar un papel importante en este proceso. Los resultados conjuntos de estos estudios implican que (a) el tiempo de residencia de P en fuentes "Pools" orgánicas más lábiles es muy corto y que, en consecuencia, el reciclaje de P a través de ellas es muy rápido, y (b) la eficacia residual de las entradas de P es alta con bajas tasas de "fijación" dentro de las formas de P más estables. Esta observación es apoyada por el alto valor residual de P de los fertilizantes medido en experimentos relacionados simultáneamente en sitios adyacentes (D. Friesen, datos no publicados). La efectividad de los diferentes sistemas en la adquisición y el reciclaje de P continuará siendo monitoreada en estos experimentos a largo plazo.

Referencias

- Baber SA. 1984. Soil nutrient bioavailability. John Wiley & Sons, Nueva York, Estados Unidos. 398 p.
- CIAT (Centro Internacional de Agricultura Tropical). 1995. Phosphorus transformations in improved pastures. En: Tropical Lowlands Program; Annual Report 1994. Working Document No. 148. Cali, Colombia. p 182–187.
- Gale MR; Grigal DF. 1987. Vertical root distributions of northern tree species in relation to successional status. Canadian Journal and Forest Research 17(8):829–834.
- Lynch JP; Beebe SE. 1995. Adaptation of beans (*Phaseolus vulgaris* L.) to low phosphorus availability. HortScience 30:1165–1171.
- Olsen SR; Sommers LE. 1982. Phosphorus. En: Page AL; Miller RH; Keeney DR, eds. Methods of soil analysis. Part 2: Chemical and microbiological properties. Agronomy 9, Part 2. 2nd ed. American Society of Agronomy, Soil Science Society of America, Madison, WI, Estados Unidos. p 403–430.
- Pandey S; Ceballos H; Magnavaca R; Bahia Filho AFC; Duque-Vargas J; Vinasco LE. 1994. Genetics of tolerance to soil acidity in tropical maize. Crop Science 34:1511–1514.
- Pellet D; El-Sharkawy MA. 1993. Cassava varietal response to phosphorus fertilization. II. Phosphorus uptake and use efficiency. Field Crops Research 35(1):13–20.

- Rao IM; Zeigler RS; Vera R; Sarkarung S. 1993. Selection and breeding for acid-soil tolerance in crops: Upland rice and tropical forages as case studies. *BioScience* 43:454–465.
- Rao IM; Ayarza MA; Herrera P. 1997a. Root distribution and production in native and introduced pastures in the South American savannas. En: Proceedings of the 5th Symposium of the International Society of Root Research. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Países Bajos.
- Rao IM; Borrero V; Ricaurte J; García R; Ayarza MA. 1997b. Adaptive attributes of tropical forage species to acid soils. III. Differences in phosphorus acquisition and utilization as influenced by varying phosphorus supply and soil type. *Journal of Plant Nutrition* 20(1):155–180.
- Swift MJ, ed. 1984. Soil biological processes and tropical soil fertility: A proposal for a collaborative programme of research. *Biology International Special Issue 5*. The International Union of Biological Sciences, París, Francia. 38 p.
- Thomas GW. 1982. Exchangeable cations. En: Page AL; Miller RH; Keeney DR, eds. *Methods of soil analysis. Part 2: Chemical and microbiological properties*. Agronomy 9, Part 2. 2nd ed. American Society of Agronomy, Soil Science Society of America, Madison, WI, Estados Unidos. p 159–165.
- Thomas RJ; Asakawa NM. 1993. Decomposition of leaf litter from tropical forage grasses and legumes. *Soil Biology and Biochemistry* 25(10):1351–1361.
- Tiessen H; Moir JO. 1993. Characterization of available P by sequential extraction. En: Carter MR, ed. *Soil sampling and methods of analysis*. Lewis Publishers, Boca Raton, FL, Estados Unidos. p 75–86.
- Vepraskas MJ; Hoyt DG. 1988. Comparison of the trench-profile and core methods for evaluating root distributions in tillage studies. *Agronomy Journal* 80(2):166–172.

Destinos del Fósforo Aplicado como Fertilizante en Oxisoles de los Llanos Orientales de Colombia: Fraccionamiento Secuencial

G. Borrero¹, D. Friesen², A. Oberson³, M. Rodríguez⁴ e I. M. Rao⁵

Resumen

Los objetivos principales del estudio fueron cuantificar el nivel óptimo de P y la forma de aplicación del fertilizante soluble superfosfato triple (SFT) y determinar la dinámica del P inorgánico (Pi) y orgánico (Po) en sus diferentes "Pools" en el suelo a través del tiempo, en la altillanura plana, en un suelo ácido altamente meteorizado (Oxisol) de baja fertilidad y alta capacidad de fijación de P, en un ensayo satélite al Ensayo Culticore, denominado P residual en un sistema de cultivo rotacional de maíz (primer semestre) y soya (segundo semestre), establecido en 1993 y hasta 1997. Se compararon aplicaciones anuales de P: 0, 20, 30 y 50 kg/ha contra una única aplicación realizada al inicio del establecimiento del ensayo. Las dosis evaluadas de P residual fueron 80, 120 y 200 kg/ha. Se utilizó la técnica del fraccionamiento secuencial de P modificada por Hedley et al. (1982) y Tiessen y Moir (1993), en la diferenciación de los diferentes "Pools" de P en el suelo. Las diferencias en tamaño de fracciones se presentaron después de 2 años de fertilización, tanto para tratamientos anuales como para los residuales. Solamente las aplicaciones anuales de P mayores o iguales a 30 kg/ha mostraron incremento en las concentraciones de Pi disponible y Pi menos disponible, y para dosis mayores a ésta el aumento en el rendimiento de grano no fue tan marcado; sin embargo, resulta en un rendimiento mayor que cuando se aplica en una única dosis (residual) equivalente a 120 P kg/ha. La cantidad de P transportado al grano de maíz fue similar entre la aplicación anual y la residual, en especial con las dosis altas. Durante los 4 años de experimentación en el campo, la aplicación única de P al inicio del ensayo (P residual) mantuvo una buena cantidad de P disponible del suelo, comparado con las aplicaciones anuales. Respecto a la dinámica de las fracciones a través del tiempo se

-
1. Química de suelos, Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), Cali, Colombia. g.borrero@cgiar.org
 2. Química de suelos/Agronomía, Consultor Internacional, Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo (CIMMYT), Addis Ababa, Etiopía. d.friesen@cgiar.org
 3. Química de suelos/Nutrición de plantas, ETH-Zürich, Institute of Agricultural Sciences, Lindau, Suiza. astrid.oberson@usys.ethz.ch
 4. Biología, Consultor. marce_ro17@hotmail.com
 5. Fisiología y Nutrición de plantas, CIAT. i.rao@cgiar.org

observaron resultados muy similares durante el período de evaluación, con valores promedio de 4.7%, 65% y 25.4% para P_i y P_o lábil, P_i estable y P_o estable, respectivamente; en resumen, aproximadamente un 10% en fracciones lábiles y 90% en fracciones estables con respecto al P total en el suelo.

Palabras claves: Oxisoles, fósforo residual, fraccionamiento secuencial

Introducción

La altillanura plana colombiana ocupa alrededor de 3.5 millones de hectáreas, y es la zona de los Llanos Orientales más favorable por su relieve para la agricultura, aparte del piedemonte (Rippstein et al., 2001). El factor limitante ha sido su suelo ácido altamente meteorizado (Oxisol), de escasa fertilidad y una alta capacidad de fijación de P.

La presión mundial por suministro de alimentos, cuidado del medio y los incrementos en los costos de insumos nos sugieren el planteamiento de estrategias eficientes de fertilización; de ahí la necesidad de identificar los efectos residuales del P y conocer su destino y su tasa de movilidad entre sus diferentes formas en el suelo.

Con la información obtenida durante 5 años en un ensayo de campo, se enfocó el estudio hacia la dinámica del P proveniente del fertilizante y la influencia que los sistemas pueden ejercer sobre su permanencia y disponibilidad en el suelo. Se compararon aplicaciones anuales de P contra una única aplicación en el establecimiento del ensayo (P residual).

Los objetivos principales del estudio fueron cuantificar el nivel óptimo de P y la forma de aplicación para los fertilizantes de P soluble y determinar la dinámica del P inorgánico (P_i) y el P orgánico (P_o) del suelo en sus diferentes "Pools" a través del tiempo.

Materiales y métodos

El efecto del fertilizante de P soluble, superfosfato triple (SFT) se evaluó en un ensayo satélite (P residual) al Ensayo Culticore, realizado en el Convenio CIAT-Corpoica (Centro Internacional de Agricultura Tropical-Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria), en el Centro Nacional de Investigación (CNI) en Carimagua, Llanos Orientales de Colombia, en un sistema de cultivo rotacional de maíz (primer semestre) y soya (segundo semestre), establecido en 1993.

Los tratamientos de aplicación y dosis de P fueron: tratamientos de P residual, con una única dosis inicial al establecimiento del ensayo de 80, 120 y 200 kg/ha y tratamientos con aplicaciones anuales de P de 0, 20, 30 y 50 kg/ha, que en los 4 años equivaldrían a cada dosis de P residual aplicado. Se evaluaron en total siete tratamientos hasta 1997, año en el cual no hubo aplicación.

La técnica del fraccionamiento químico secuencial de P de Hedley et al. (1982) y Tiessen y Moir (1993) permitió separar el suelo en diferentes grados de disponibilidad, removiendo progresivamente menos P disponible del suelo con cada subsecuente extracción, usando los siguientes extractantes: H₂O con tiras de resina de intercambio aniónico, 0.5M NaHCO₃, 0.1M NaOH, 1.0M HCl y HClcc (concentrado y caliente) y digestión final con HClO₃.

Resultados y discusión

La aplicación de P mejoró la producción de maíz y la cantidad de P transportado a los granos (Figura 1). El aumento en el rendimiento de grano no fue tan marcado con las aplicaciones mayores a 30 kg/ha por año. Las producciones resultantes para las aplicaciones anuales fueron mejores que las correspondientes a una sola aplicación residual hacia el final de la evaluación. La cantidad de P transportado a los granos de maíz fue similar entre aplicación anual y residual, sobre todo con las dosis altas (50 y 200 kg/ha, respectivamente).

En la Figura 2 se observa la distribución del P en formas inorgánicas y orgánicas, según el fraccionamiento secuencial de Hedley. Aunque las aplicaciones de P inicialmente produjeron un aumento en la concentración de P en todas las fracciones inorgánicas, dichos incrementos no reflejaron el incremento en los niveles aplicados. La diferencia en tamaño de fracciones se presentó después de 2 años de fertilización, tanto para los tratamientos anuales como para los

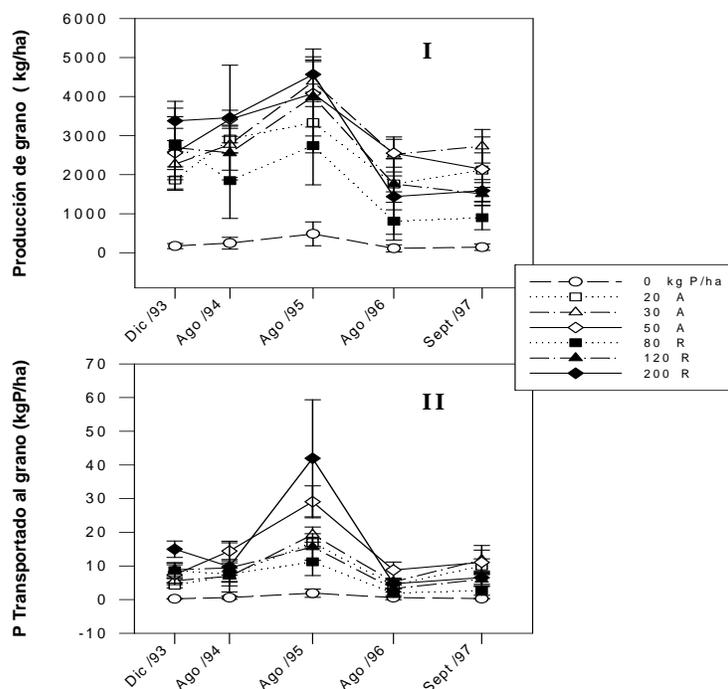


Figura 1. Efecto de la aplicación anual (A) o residual (R) de P en la producción (I) y en el P transportado al grano de maíz (II). Carimagua, Llanos Orientales de Colombia.

residuales. Solamente las aplicaciones anuales de P mayores o iguales a 30 kg/ha mostraron aumento en las concentraciones de Pi lábil (disponible) y Pi secundario (menos disponible). La tendencia de la fracción orgánica fue constante durante el período evaluado, confirmandose así que el método de fraccionamiento da mucha información de la parte inorgánica del suelo, especialmente de la más disponible, que de las fracciones orgánicas disponibles y menos disponibles.

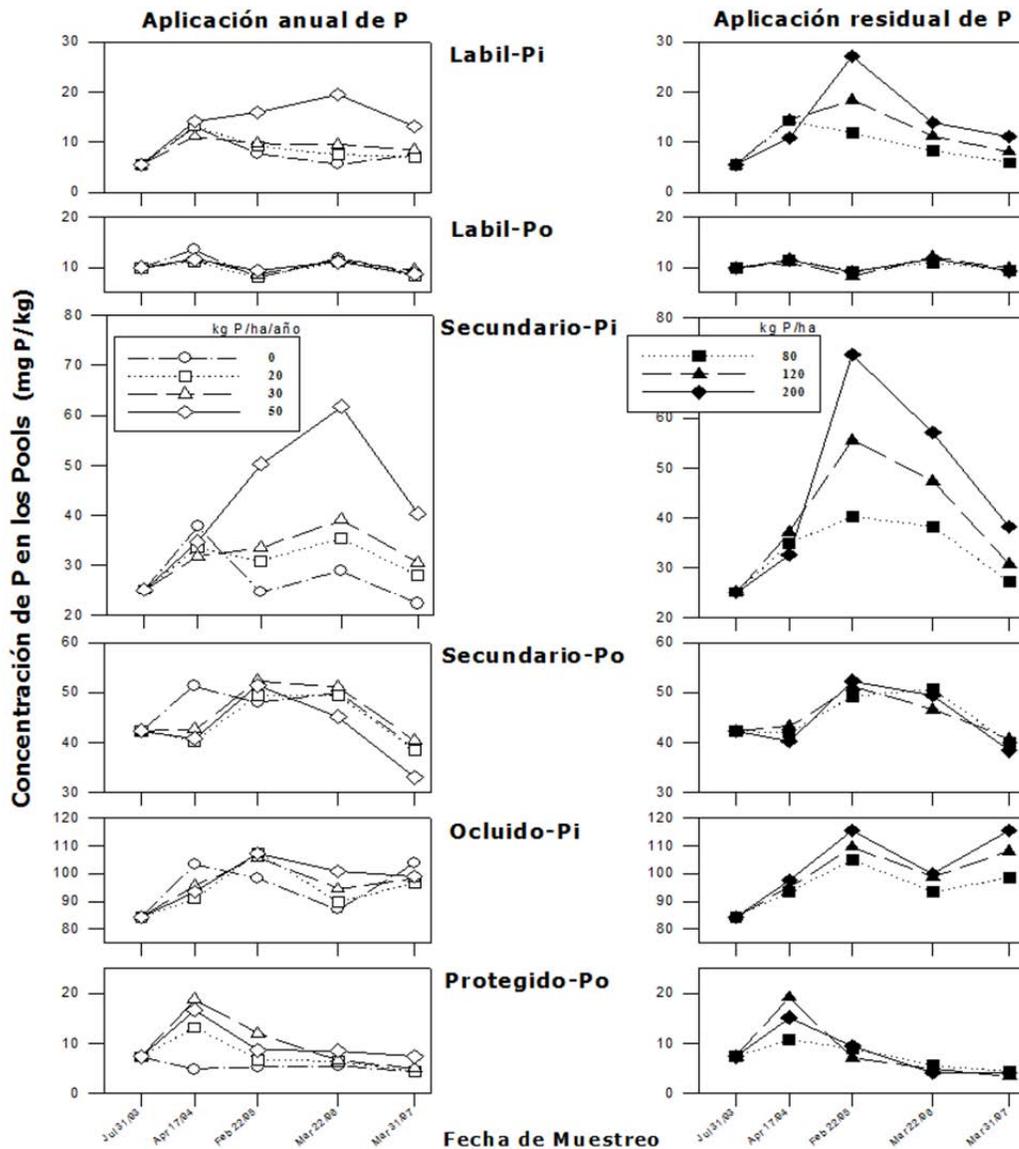


Figura 2. Dinámica de P dentro de los diferentes “Pools” del suelo en un Oxisol bajo rotación maíz-soya con aplicaciones anuales y residuales de fertilizante fosfatado (SPT). Carimagua, Llanos Orientales de Colombia.

Igualmente, las fracciones Pi-HCl 1M y Pt residuo (P total) presentaron resultados similares a través del tiempo, siendo el Pi-HCl una fracción no relevante dentro del fraccionamiento. Esto confirma la teoría de Tiessen y Moir (1993) acerca de que esta fracción se puede omitir para Oxisoles no fertilizados con roca fosfórica.

En general, los valores promedio de las fracciones lábiles y estables obtenidos de todos los tratamientos fueron constantes entre sí, en especial las fracciones orgánicas. Se graficaron los porcentajes de Pi y Po para los años evaluados, usando las combinaciones “Pools” para fracciones lábiles, secundarias, ocluidas y protegidas, descritas por Hedley et al. (1982), O’Halloran (1986), Oberson et al. (1993), Tiessen y Moir (1993) y Selles et al. (1995) y presentadas en el Cuadro 1. Estos porcentajes se presentan en la Figura 3, y expresan la poca variabilidad de los tamaños de las fracciones a través del tiempo.

Se puede concluir que las aplicaciones mayores a 30 kg/ha no mostraron un nivel significativamente más alto de rendimiento, y después de esta dosis el P pareció no ser un factor limitante para el cultivo. Sin embargo, esta dosis de aplicación anual resultó en un rendimiento más alto que cuando se aplicó la misma cantidad de P proyectada para los 4 años en una sola dosis (120 P kg/ha) y resultaron en incrementos de las concentraciones de Pi lábil (resin+bic) y Pi secundario (NaOH), determinadas por el método de fraccionamiento secuencial.

Cuadro 1. Agrupación de los “Pools” de P en el suelo y las fracciones de P utilizadas para el estudio.

“Pools” de P en el suelo ^a	Fracciones
Pi lábil	Pi-resina + Pi-HCO ₃ ⁻
Po lábil	Po-agua + Po-HCO ₃ ⁻
Pi secundario	Pi-NaOH
Po secundario	Po-NaOH
Pi ocluido	Pi-HCl dil + Pi-HCl cc + P-residuo
Po protegido	Po-HCl cc

a. Lábil = disponible; secundario = formas menos disponibles; estable = secundario + ocluido o protegido.

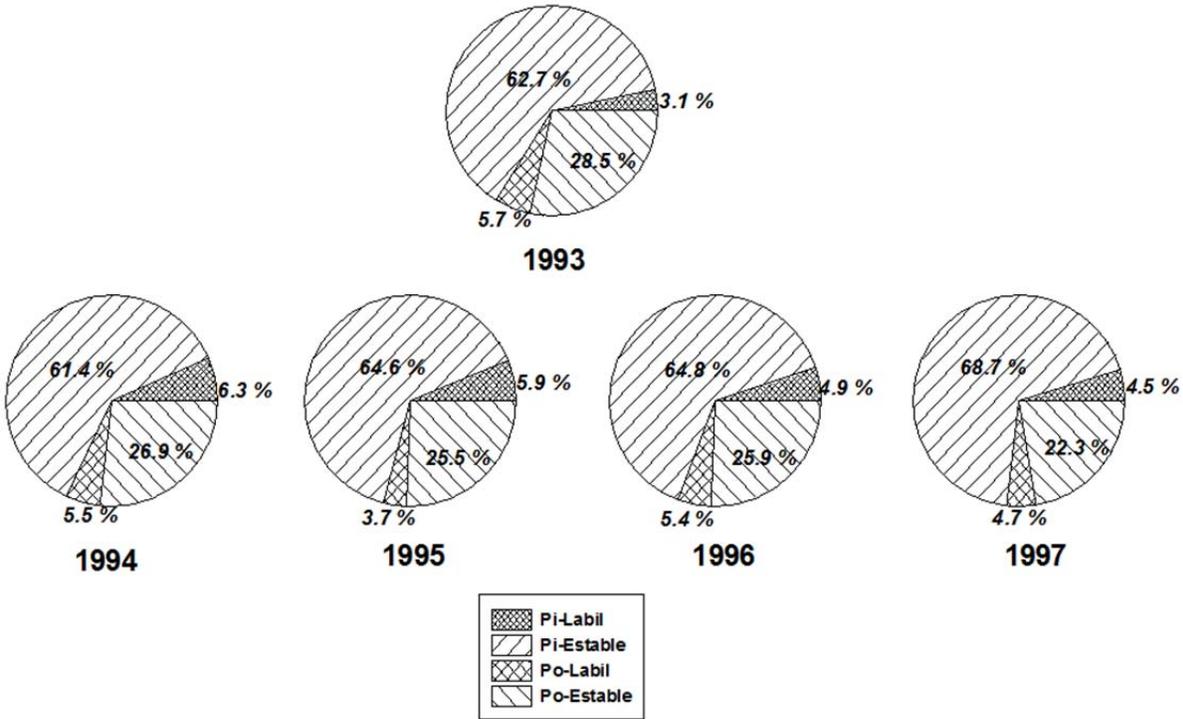


Figura 3. Porcentaje promedio de fracciones lábiles y estables, durante un período de 5 años, utilizando el sistema rotacional maíz-soya. Carimagua, Llanos Orientales de Colombia.

Conclusiones

Durante los 4 años de experimentación en el campo, la única aplicación de P al inicio del ensayo (P residual) mantuvo una buena cantidad de P disponible del suelo, comparado con las aplicaciones anuales.

Un modelo de simulación que se verificó en Oxisoles brasileños (Wolf et al., 1987) se aplicó en este ensayo y subvaloró el rendimiento de maíz para el periodo de 4 años, indicando así que el valor residual del fertilizante en este sitio es mayor que el de los otros sitios de Oxisoles. El modelo, sin embargo, predijo bastante bien la evolución de rendimiento de grano en función del tiempo.

En cuanto a la dinámica de las fracciones a través del tiempo, se observó que los resultados fueron muy constantes al suministrar porcentajes promedio durante todo el período: 4.7, 65 y 25.4 para Pi y Po lábil, Pi estable y Po estable, respectivamente; en resumen, aproximadamente un 10% en fracciones lábiles y 90% en fracciones estables en cuanto al P total del suelo.

Referencias

- CIAT (Centro Internacional de Agricultura Tropical). 1995. Phosphorus transformations in improved pastures. En: Tropical Lowlands Program; Annual Report 1994. Working Document No. 148. Cali, Colombia. p 182–187.
- Hedley MJ; Stewart JWB; Chauhan BS. 1982. Changes in inorganic and organic soil phosphorus fractions induced by cultivation practices and by laboratory incubations. *Soil Science Society of America Journal* 46(5):970–976.
- Oberson A; Fardeau JC; Besson JM; Sticher H. 1993. Soil phosphorus dynamics in cropping systems managed according to conventional and biological agricultural methods. *Biology and Fertility Soils* 16(2):111-117.
- O´Halloran I. 1986. Phosphorus transformations in soil as affected by management. Tesis (Ph.D.). Department of Soil Science, University of Saskatchewan, Saskatoon, Canadá.
- Rippstein G; Escobar G; Motta F, eds. 2001. Agroecología y biodiversidad de las sabanas en los Llanos Orientales de Colombia. Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), Cali, Colombia. 302 p.
- Selles F; Campbell CA; Zentner RP. 1995. Effect of cropping and fertilization on plant and soil phosphorus. *Soil Science Society of America Journal* 59(1):140–144.
- Tiessen H; Moir JO. 1993. Characterization of available P by sequential extraction. En: Carter MR, ed. *Soil sampling and methods of analysis*. Lewis Publishers, Boca Raton, FL, Estados Unidos. p 75–86.
- Wolf J; de Wit, CT; Janssen H; Lathwell DJ. 1987. Modelling long-term crop response to fertilizer phosphorus. I. The model. *Agronomy Journal* 79(3):445–451.

Efecto de Sistemas de Labranza en el Rendimiento de Maíz en un Oxisol de la Sabana Colombiana: Fraccionamiento de Materia Orgánica y Fósforo del Suelo¹

T. A. Basamba², E. Barrios³, E. Amézquita⁴, I. M. Rao⁵ y B. R. Singh⁶

Resumen

La materia orgánica del suelo (MOS) y las fracciones de P juegan un papel clave en el mantenimiento de la productividad de los Oxisoles de sabanas ácidas y están fuertemente influenciados por las prácticas de labranza. En 1993 se estableció un ensayo de largo plazo sobre sostenibilidad de rotaciones de cultivos y sistemas agropastoriles en Oxisoles de las sabanas de los Llanos Orientales de Colombia, para probar los efectos de leguminosas para producción de grano, incorporación como abono verde, establecimiento de pasturas mediante cultivos como posibles componentes que podrían incrementar la estabilidad de sistemas continuos en monocultivo de cereales anuales. En este estudio se seleccionaron cinco tratamientos agropastoriles basados en el cultivo de maíz (maíz monocultivo, MMO; rotación maíz-soya para producción de grano, MRT; maíz-soya incorporada como abono verde, MAV; sabana nativa como control, SNC; y pastura establecida mediante el cultivo de maíz, MPA) y se investigaron bajo dos sistemas de labranza ['no labranza' (sin labranza), NL; labranza mínima, LM]. Se evaluó el efecto de los sistemas de labranza (NL-LM) sobre la MOS y las fracciones de P, así como sobre el rendimiento de grano de maíz bajo los cinco tratamientos agropastoriles. Los resultados mostraron que el C total del suelo, N y P fueron generalmente mejores, bajo sistemas 'no labranza', en comparación con la labranza mínima del suelo. Mientras que las fracciones de P también fueron generalmente mayores bajo sistemas 'no labranza', las fracciones de MOS no mostraron ninguna tendencia clara. Siete años después del establecimiento del ensayo (5 años de labranza convencional seguida de

1. Este documento es una traducción al español del publicado en *Soil & Tillage Research* (2006), Vol. 91, No. 1-2, T.A. Basamba, E. Barrios, E. Amézquita, I. M. Rao, B. R. Singh, Tillage effects on maize yield in a Colombian savanna oxisol: Soil organic matter and P fractions, Páginas 131-142, © 2006 Elsevier B.V. Todos los derechos reservados, con el permiso de Elsevier.

2. Biología de suelos, Makerere University, Kampala, Uganda. twaha@agric.mak.ac.ug

3. Biología de suelos, World Agroforestry Centre (ICRAF), Nairobi, Kenia. e.barrios@cgiar.org

4. Física de suelos, Consultor Internacional. eamezquitac@gmail.com

5. Fisiología y Nutrición de plantas, Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), Cali, Colombia. i.rao@cgiar.org

6. Ciencias ambientales, Norwegian University of Life Sciences, Aas, Noruega. balram.singh@umb.no

2 años de sistemas de labranza alternativa), la LM mostró un rendimiento del grano de maíz moderadamente alto en comparación con NL. El tratamiento rotación MAV tuvo valores significativamente más altos de rendimiento de maíz en los dos sistemas de labranza (4.2 t/ha), en comparación con la SNC (2.3 t/ha). Los resultados de este estudio indican que los sistemas en rotación MAV y la MPA mejoran las condiciones del suelo implementando la práctica de sistemas de labranza de conservación (NL-LM) en Oxisoles de las sabanas colombianas.

Palabras claves: fracciones de materia orgánica del suelo, fracciones de fósforo, sabana, leguminosas, labranza, rendimiento de maíz

Introducción

La materia orgánica del suelo (MOS) es fundamental para mantener la productividad agrícola en las regiones tropicales, especialmente en ecosistemas de sabana. Es un factor importante que afecta la calidad del suelo y la sostenibilidad a largo plazo de la agricultura (Doran y Parkin, 1994). La MOS, junto con el manejo del suelo, la labranza en particular, influye en muchas de las propiedades físicas, químicas y biológicas de los Oxisoles (Roth et al., 1987, 1992). Los Oxisoles y Ultisoles predominan en los Llanos Orientales de Colombia. Estos suelos son infértiles y son usados tradicionalmente para ganadería extensiva, con escaso manejo y utilización de insumos, dando como resultado una productividad muy baja (Guimarães et al., 2004). Sin embargo, a largo plazo, la rotación de cultivos, junto con la labranza apropiada, pueden incrementar los niveles de MOS, contribuyendo al mejoramiento del rendimiento de los cultivos en los Oxisoles (Friesen et al., 1997; Freixo et al., 2002).

La MOS es una fuente y reservorio de nutrientes para las plantas y desempeña un papel clave en el ciclo de carbono, ya que representa el principal reservorio terrestre de este elemento, es decir, carbono (Rounsevell et al., 1999). Se ha encontrado que, mediante el fraccionamiento de materia orgánica, se aumenta la sensibilidad para detectar cambios en la MOS debido a la labranza y rotación de cultivos (Janzen et al., 1992). La magnitud del fraccionamiento por densidad permite evaluar los reservorios lábiles de la MOS que son más sensibles a las diferencias en el manejo del suelo, uso del suelo o de las prácticas de cultivo, que las evaluadas mediante el contenido de carbono total del suelo (Barrios et al., 1996, 1997). El hecho de que la MOS sea una fuente importante de P orgánico (Po) es de importancia práctica para la productividad del suelo. En estos suelos altamente degradados y de alta sorción de P, el P mantenido en reservorios orgánicos puede estar mejor protegido de la pérdida que ocurre a través de la fijación del P que fluye a los reservorios inorgánicos (Phiri et al., 2001a).

El P es un nutriente importante y su suministro está en escasa relación en la mayoría de los ecosistemas naturales. El P es el principal nutriente limitante para la producción de cultivos en suelos tropicales altamente meteorizados (Linguist et al., 1997; Rao et al., 1999). La deficiencia es causada principalmente por la fuerte adsorción de H_2PO_4^- a óxidos e hidróxidos

de Fe y Al (sesquióxidos), que convierten grandes proporciones de P inorgánico (P_i) a formas no disponibles para las plantas (Fontes y Weed, 1996). Sin embargo, las plantas que crecen en estos suelos tienen acceso a algunas fracciones de P (especialmente las fracciones solubles y moderadamente solubles) que están mejor estimadas por procedimientos de fraccionamiento de P, tales como el método de Hedley (Tiessen y Moir, 1993; Friesen et al., 1997). Este procedimiento implica la extracción secuencial de P_i y P_o con extracciones cada vez más fuertes. Esto permite la caracterización de las diferentes fuentes de P_i y P_o que se supone son diferencialmente disponibles para las plantas (Beck y Sánchez, 1994; Phiri et al., 2001a, 2001b, 2003a, 2003b; Basamba et al., 2006, 2007). En comparación con los otros nutrientes principales, el P es el menos móvil y disponible para las plantas en las condiciones de la mayoría de los suelos, particularmente en Oxisoles y, por lo tanto, es probable que se vea muy afectado por la labranza. La manipulación mecánica del suelo durante la labranza puede aumentar las posibilidades de contacto entre la solución del suelo o el P proveniente del fertilizante y exponer las partículas del suelo; esto facilita la formación de compuestos estables de P insolubles (Hinsinger, 2001; Picone et al., 2003). La labranza, en particular el sistema 'no labranza', afecta algunas características químicas relacionadas con la acidez del suelo que pueden influir en la disponibilidad de P, el crecimiento de plantas y el rendimiento de los cultivos (Ernani et al., 2002). La materia orgánica y el P se acumulan pocos centímetros en la parte superior de horizonte, en suelos 'no labranza', en comparación con suelos con "labranza convencional" (Selles et al., 1997; Díaz-Zorita y Grove, 2002), lo cual puede reducir la toxicidad por Al (Rhoton, 2000). Otros nutrientes también se acumulan cerca de la superficie en suelos 'no labranza', causando incremento en la concentración de electrolitos y sorción de P. Estos efectos pueden contrarrestar los beneficios de la MOS y la acumulación de P en la toxicidad por Al en los suelos 'no labranza'.

Recientemente, el interés en experimentos de largo plazo ha aumentado en todo el mundo, debido a que ellos son la única manera de identificación de indicadores adecuados para la alerta temprana de la disminución de la productividad y daños a los ecosistemas (Barnett et al., 1995; Bessam y Mrabet, 2003). Además, los datos a largo plazo pueden ser utilizados en la verificación o evaluación de modelos predictivos. Los objetivos de este estudio fueron evaluar el impacto de la labranza mínima (reducida intensidad de arado seguido de siembra directa), la 'no labranza' o labranza cero (siembra directa) y los sistemas agropastoriles en: (a) las fracciones de materia orgánica del suelo, (b) las fracciones de P del suelo, y (c) el rendimiento en grano de maíz en un experimento a largo plazo sobre un suelo ácido de sabana.

Materiales y métodos

Descripción del área de estudio

Los estudios se llevaron a cabo en el Ensayo Culticore, establecido en el Centro Nacional de Investigación (CNI) en Carimagua (4° 37' N, 71° 19' O y 175 m.s.n.m.), Llanos Orientales de Colombia. El área presenta dos estaciones climáticas bien diferenciadas, una estación húmeda

desde inicio de marzo a diciembre, y otra estación seca entre diciembre y la primera semana de marzo. La precipitación media anual y la temperatura en esta zona son 2240 mm y 27 °C, respectivamente. Antes del inicio del Ensayo de largo plazo, el área estaba bajo vegetación de sabana nativa (principalmente pastos del género *Andropogon* y *Trachypogon*) y el uso del suelo predominante era la ganadería extensiva. Fisiográficamente, los suelos son planos (pendiente <5%), típicos del ecosistema de sabana colombiana. Los suelos son profundos, presentan algunas propiedades físicas adecuadas y otras factibles a mejoramiento, pero presentan severas limitaciones químicas tales como alta saturación de Al, bajo C orgánico, N y P disponibles (Friesen et al., 1997). Son Oxisoles bien drenados, franco arcillo limosos y se clasifican como Tropeptic Haplustox Isohipertérmicos fino arcillosos caoliniticos en el sistema de clasificación del suelo del USDA (Soil Survey Staff, 1994).

Diseño experimental y tratamientos

El Ensayo de largo plazo Culticore fue establecido en 1993 para investigar sistemas de producción sostenibles para las sabanas de suelos ácidos (Figura 1) (ver Capítulo 4 de ésta publicación). Esta parte del estudio presenta resultados únicamente para los sistemas basados en maíz, sembrados en el 2001. La rotación maíz-soya (para producción de grano) correspondió a la séptima, luego del establecimiento del ensayo en 1993 y 2 años después de la puesta en práctica de los sistemas de labranza 'no labranza' (NL) y labranza mínima (LM). Los sistemas basados en maíz incluyeron: (a) maíz monocultivo (MMO), (b) rotación maíz-soya para producción de grano (MRT), (c) rotación maíz-soya incorporada como abono verde (MAV), (d) pastura establecida mediante el cultivo de maíz (MPA), y (e) sabana nativa como control (SNC). En los sistemas en rotación, la soya tanto para producción de grano como para incorporación como abono verde se sembró en el segundo semestre, luego de que el primer semestre se sembrara con maíz. La pastura de *Panicum maximum* + leguminosas se sembraron una vez establecido el maíz en 1994, se pastorearon durante 4 años y se renovaron en 1998. Las parcelas de sabana nativa se mantuvieron en su condición natural para las comparaciones de línea de base y se utilizaron como control para evaluar los efectos de NL y LM sobre las fracciones de MOS y P y sobre el rendimiento de grano de maíz. En los sistemas basados en maíz se aplicaron 2000 kg/ha de cal dolomita (20% Ca y 10% Mg) 30 días antes del establecimiento del ensayo y se realizaron aplicaciones anuales de mantenimiento de 200 kg/ha. Cada año, el cultivo de maíz recibió 120 kg N/ha (dividido en tres dosis de 40 kg), 80 kg P/ha y 100 kg/ha. Las leguminosas (tanto para producción de grano como incorporadas como abono verde) recibieron 20, 40 y 60 kg/ha de N, P y K, respectivamente. Las pasturas se fertilizaron cada 2 años con 20 kg P/ha. Las parcelas fueron de tamaño 0.36 ha (200 × 18 m) para los sistemas en monocultivo y en rotación y de 0.72 ha (200 × 36 m) para las MPA, lo cual permitió el pastoreo de ganado y el uso de maquinaria convencional (Amézquita et al., 2002).

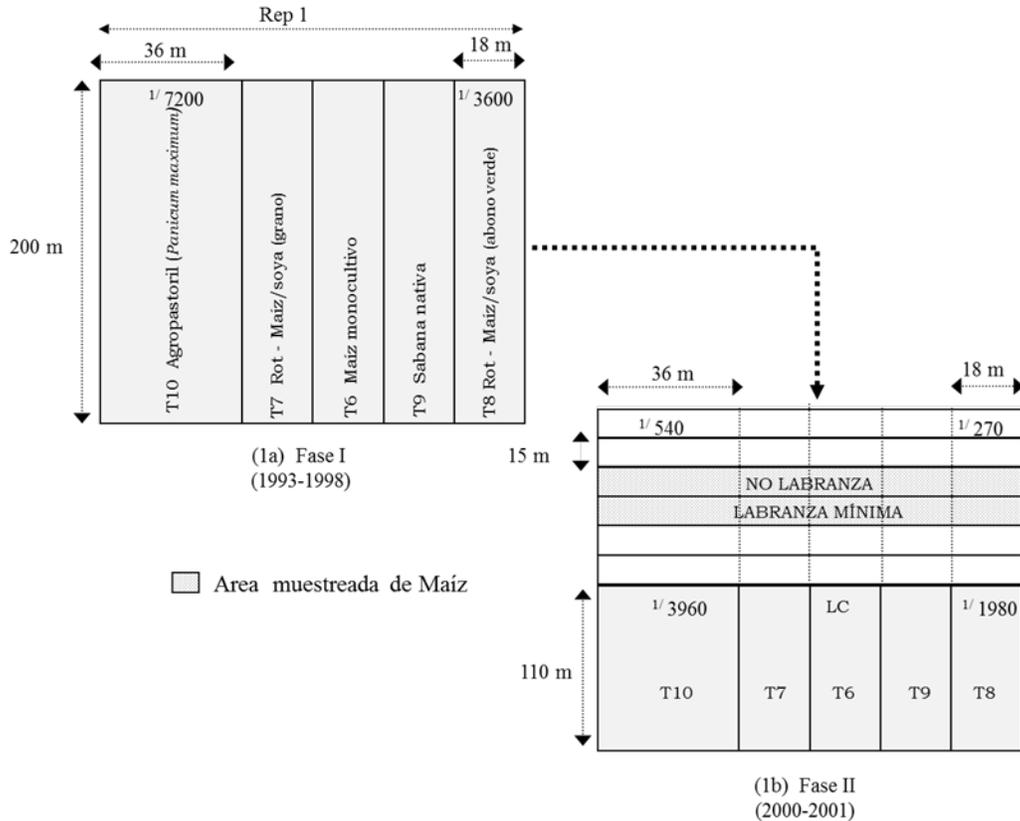


Figura 1. Diseño experimental del Ensayo Culticore en la Fase I y el nuevo diseño en la Fase II. Solo una de las cuatro repeticiones de campo se ha mostrado para mayor claridad.

El Cuadro 1 describe los tratamientos. La distancia de siembra entre surcos y plantas fue de 80 y 15 cm, respectivamente. El sistema de labranza (NL) en este estudio significa que las parcelas se sometieron a labranza convencional (LC) durante el primer período de 5 años, y luego la siembra de la rotación maíz-soya se realizó con una sembradora de siembra directa (no labranza), es decir, no se preparó el suelo antes de la siembra. La LC realizada los primeros 5 años implicaba el uso de arado de discos (3–4 pases) para la preparación del suelo antes de cada período de siembra. El sistema de labranza mínima (LM) significa que después de 5 años de LC se realizó la labranza mediante un pase de cincel de implementos separados 60 cm, a 30 cm profundidad del suelo; adicionalmente se realizó un pase de arado de discos para nivelar la superficie del suelo previo a la siembra de maíz y/o soya con sembradora de siembra directa. La LM involucró intensidad reducida de labranza antes de la siembra.

En resumen, significa que después de 5 años de haber sido cultivado el suelo de forma continua con LC en los sistemas de labranza tanto bajo NL y LM, la siembra se realizó mediante siembra directa, para determinar si el efecto acumulativo de los tratamientos en el suelo habían creado las condiciones apropiadas para el establecimiento de sistemas bajo este tipo de

Cuadro 1. Tratamientos y descripción de los sistemas agropastoriles de producción. Ensayo Culticore, Carimagua, Llanos Orientales de Colombia.

Tratamiento	Sistema de producción	Descripción
MMO	Monocultivo de maíz	Maíz monocultivo, sembrado en forma continua el primer semestre de cada año; el segundo semestre en barbecho; preparación temprana de suelo al final de la temporada de lluvias.
MRT	Rotación maíz-soya (grano)	Maíz (primer semestre); en rotación con soya (segundo semestre); residuos incorporados antes de la siembra del semestre siguiente.
MAV	Rotación maíz-soya (abono verde)	El maíz (primer semestre); en rotación con soya (segundo semestre); incorporación de soya como abono verde en época de floración (máxima producción de biomasa), al final de la época de lluvias.
SNC	Sabana nativa (control)	Sabana nativa en condición natural, manejada tradicionalmente mediante quema anual durante la época seca; sin pastoreo.
MPA	Maíz-pastura	Monocultivo de maíz en el primer año; siembra de la pastura de <i>Panicum maximum</i> + <i>Glycine wightii</i> + <i>Arachis pintoi</i> + <i>Pueraria phaseoloides</i> una vez establecido el cultivo de maíz el segundo año; pastoreo (4 años) mediante rotación de potreros, garantizando permanencia de leguminosas.

labranza 'no labranza'. Los tratamientos en sistema de labranza NL representarían el efecto acumulativo de los tratamientos, mientras que las parcelas bajo el sistema LM representarían un mejoramiento adicional de las condiciones físicas del suelo.

Muestreo de suelo y procedimientos analíticos de laboratorio

En abril de 2001 se recolectaron las muestras de suelo de 0–10 cm de profundidad. Estudios anteriores no mostraron diferencias estadísticamente significativas en las fracciones de MOS y P en las capas más profundas (Phiri et al., 2001a, 2001b, 2003a, 2003b; Amézquita et al., 2002; Basamba et al., 2007). Antes de tomar las muestras de suelo se retiraron cuidadosamente los residuos vegetales de la superficie. Una muestra de suelo compuesta de 25 núcleos se recogió en una cuadrícula patrón en todas las parcelas experimentales. Las muestras de suelo se secaron al aire, las raíces visibles de las plantas se extrajeron, y luego las muestras se molieron cuidadosamente y se pasaron a través de un tamiz de 2 mm. Una fracción de <2 mm se utilizó para todos los análisis y procedimientos de fraccionamiento. Todos los análisis de laboratorio se llevaron a cabo por duplicado.

El C orgánico total se determinó colorimétricamente después de la oxidación húmeda con dicromato de potasio acidificado y calentamiento externo (Anderson e Ingram, 1993). El N y el P totales del suelo se determinaron por digestión con ácido sulfúrico concentrado usando selenio como catalizador, seguido por determinación colorimétrica con un analizador automático (Skalar Sun Plus, Países Bajos).

El fraccionamiento por tamaño-densidad de la MOS se efectuó como lo describen Phiri et al. (2001b). En resumen, una muestra de suelo se secó al aire (250 g), se humedeció gradualmente, luego fue inundada con 2 litros de agua, se mezcló completamente y se tamizó a través de dos tamices superpuestos de 250 mm (parte superior) y 150 mm (parte inferior). Un chorro de agua a través del tamiz superior destruyó los macroagregados. Los materiales retenidos en los tamices se lavaron y se agitaron con el fin de separar la materia macro-orgánica (> 150 mm) a partir de material mineral por decantación. El mezclado y la decantación se repitieron varias veces hasta que no quedó material flotante. La materia macro-orgánica posteriormente se fraccionó por densidad en una suspensión de sílice (Ludox™, Du Pont) ajustada a 1.13 g/cm³. La fracción flotante, que corresponde a la fracción liviana [Ludox Light (LL)] fue colectada. La fracción restante en el tamiz se colocó en Ludox ajustado a 1.37 g/cm³. La nueva fracción flotante fue la fracción de Ludox intermedia (LM), y la fracción no flotante corresponde a la fracción pesada Ludox (LH). Las tres fracciones se lavaron con agua corriente, seguida de agua desionizada, y después se secaron hasta obtener un peso constante a 40 °C. Después de pesar las fracciones de MOS se molieron en un mortero hasta <0.3 mm y luego se analizaron C, N y P (Carter, 1993).

El fraccionamiento de P se llevó a cabo mediante un procedimiento de fraccionamiento secuencial reducido de P, como lo describen Phiri et al. (2001b) y Tiessen y Moir (1993), en el que se utilizaron 0.5 g de muestra de suelo tamizada (2 mm). Se aplicó una secuencia de extractantes con fuerza creciente (H₂O, NaHCO₃, NaOH y HClO₄, respectivamente), para subdividir el Pi total del suelo y las fracciones orgánicas (Po). Se separaron las siguientes fracciones:

- a. Las membranas de resina de intercambio de aniones, en forma de bicarbonato, se utilizaron para extraer Pi libremente intercambiable, llamado aquí Pi-resina. El persulfato de potasio (K₂S₂O₈) se utilizó para digerir el Po restante en el agua en la etapa de extracción de Pi-resina.
- b. El Pi y Po lábiles adsorbidos en la superficie del suelo, incluyendo algunos P microbianos, fueron extraídos con NaHCO₃ (bicarbonato de sodio) a 0.5 M y pH 8.5.
- c. El Pi más fuertemente ligado a compuestos de Fe y Al y asociado con los compuestos húmicos fue extraído con NaOH (hidróxido de sodio) a 0.1 M.
- d. El HClO₄ (ácido perclórico) se utilizó para digerir y extraer el residuo que contiene Pi insoluble y formas más estables de Po (P residual).

Se midió el P total en los extractos de NaHCO_3 y NaOH después de la digestión con $\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_8$, y el P_o calculado como la diferencia entre el P total y P_i en los extractos de NaHCO_3 y NaOH , respectivamente. El P total del suelo se determinó por el método de digestión HClO_4 , descrito por Olsen y Sommers (1982). Las concentraciones de P_i en todas las digestiones y los extractos se midieron colorimétricamente por el método del ácido ascórbico-molibdato, descrito por Murphy y Riley (1962).

Rendimiento de grano de maíz y productividad del sistema

En el 2001 se registraron los rendimientos de grano de maíz evaluados a cosecha. El rendimiento de grano se realizó mediante sub-muestreo en cada parcela, en un área de 40 m^2 , correspondiente a cinco surcos de maíz de 10 m de longitud cada uno. El rendimiento de grano fue ajustado a condiciones de humedad estándar.

Análisis estadístico

Se llevaron a cabo análisis de varianza (ANOVA) para los parámetros químicos del suelo, parámetros de MOS y los datos de rendimiento del grano de maíz, para determinar el impacto del manejo de la labranza (NL y LM) y de los sistemas agropastoriles. Los promedios significativos se separaron por la prueba DMS (SAS Institute Inc., 1999). Los análisis de covarianza se llevaron a cabo en los datos de suelo recolectados al final de los primeros 5 años del ensayo, con el fin de discriminar el impacto de los nuevos sistemas de cultivo y de manejo del sistema de labranza de los tratamientos anteriores basados en el cultivo de maíz. Los análisis de correlación se realizaron utilizando los promedios de los tratamientos. La mención de significación estadística en este estudio se refiere a $P < 0.05$.

Resultados y discusión

Características químicas del suelo

Se encontraron diferencias significativas entre el manejo de la labranza (NL, LM) para el contenido de C total y N total (Cuadro 2). Los suelos bajo NL consistentemente mostraron mayores valores totales de C y N que los suelos manejados con LM. Esta diferencia probablemente es el resultado de mayores pérdidas de MOS en LM a causa de algún grado de alteración del suelo por el uso de cincel en comparación con NL. Estos hallazgos coinciden con los resultados reportados por Lal (1997), quien califica el sistema 'no labranza' como una práctica de manejo de suelo que mejora las características químicas y físicas de los suelos tropicales de baja fertilidad. Por otra parte, el sistema 'no labranza' también se ha reportado por inducir la acumulación de P total del suelo y otros nutrientes en suelos tropicales y subtropicales a través del aumento de la cantidad de materia orgánica (Pezzarossa et al., 1995). Se presentaron diferencias significativas para N total y P total entre los sistemas agropastoriles (Cuadro 2).

Cuadro 2. Efecto de cinco sistemas agropastoriles bajo los sistemas 'no labranza' (NL) y labranza mínima (LM) en el contenido de C, N y P total del suelo.

Parámetros (suelo)	Suelo total (mg/kg)	Nivel de significancia		
		Labranza	Sistema agropastoril	L × A ^a
C	24713	<0.0001	0.385	0.085
N	1807	0.0022	0.0084	0.984
P	348	0.0576	<0.0001	0.869

a. L = labranza, A = agropastoril.

Los valores más altos de N total en el suelo se encontraron en MPA, mientras que los de P total se encontraron en MRT y MAV, los cuales recibieron mayores entradas de P (Cuadro 3). Es probable que la presencia de leguminosas bien adaptadas de rápido crecimiento como cultivos de cobertura en MPA hayan hecho una contribución significativa al N total almacenado en el suelo. Los valores más bajos de N total en el suelo se encontraron en MAV, lo que corrobora el alto potencial de pérdidas de N por lixiviación observado anteriormente en este sistema (Friesen et al., 1998; Thomas et al., 2004). La incorporación de residuos de cosecha de soya antes del inicio de la estación lluviosa, pudo haber facilitado la rápida descomposición y la posterior liberación de nutrientes bajo MRT durante la época lluviosa. Se encontraron interacciones estadísticamente no significativas entre los sistemas de labranza y los sistemas agropastoriles.

Cuadro 3. Efecto de los sistemas agropastoriles bajo los sistemas 'no labranza' (NL) y labranza mínima (LM) en el contenido de C, N y P total del suelo.

Sistema agropastoril	C total (mg/kg)		N total (mg/kg)		P total (mg/kg)	
	LM	NL	LM	NL	LM	NL
MMO	24825	25950	1755	1963	369	374
MRT	23675	25213	1864	2012	401	412
MAV	23243	24350	1473	1585	387	418
SNC	21913	25913	1556	1737	251	260
MPA	24538	27325	1956	2133	292	318
SED ^a	877	1065	103	120	17	21

a. SED: Error estándar de la diferencia de medias.

Fraciones de fósforo en el suelo y disponibilidad

La evaluación de P disponible entre las fracciones de P es fundamental para el manejo de suelos altamente meteorizados como Oxisoles y Ultisoles (Guo et al., 2000). Se ha reportado que existe P en los suelos de múltiples formas químicas y reservorios que están disponibles para las plantas en diferentes escalas de tiempo (Fixen y Grove, 1990). Para caracterizar la disponibilidad de P en el suelo, el método de fraccionamiento de Hedley ha sido usado ampliamente. Este procedimiento, en su forma original (Hedley et al., 1982) o en forma modificada (Tiessen y Moir, 1993; Beck y Sánchez, 1994), elimina el P disponible del suelo, primero con extractantes débiles y luego las formas de P más estables, con extractantes fuertes. Esto ha llevado a la separación de fracciones de P en el suelo en tres fuentes, es decir, la fracción fácilmente disponible (biológicamente disponible y fácilmente mineralizable), la fracción de resistencia moderada (moderada y reversible disponible) y la fracción residual estable (escasamente disponible y altamente resistente) (Guo y Yost, 1998). El P biológicamente disponible ($Po-H_2O$, Pi -resina, $Pi-NaHCO_3$ y $Po-NaHCO_3$) es el primero en ser removido del suelo por las raíces de las plantas y está disponible para las plantas en un tiempo relativamente corto, es decir, desde unos pocos días a unas pocas semanas (Cross y Schlesinger, 1995).

El P en P -resina está 'fácilmente disponible' para ser extraído por las plantas, mientras que $Po-H_2O$ y $Po-NaHCO_3$ es 'fácilmente mineralizable'. El P moderadamente disponible incluye $Po-NaOH$ y $Pi-NaOH$ y está disponible para las plantas a mediano plazo, es decir, desde unos pocos meses hasta unos pocos años (Beck y Sánchez, 1994). El P escasamente disponible y altamente resistente incluye el Pi insoluble y formas más estables disponibles en el largo plazo, por ejemplo en uno o más ciclos de cultivo.

Se presentaron diferencias significativas entre los sistemas de labranza para las fracciones de P seleccionadas: $Po-H_2O$, $Po-NaHCO_3$, $Pt-NaHCO_3$ y $Po-NaOH$ (Cuadro 4). Los sistemas agropastoriles bajo LM en general presentaron mayores valores de $Po-H_2O$ y $Po-NaOH$ que el sistema de NL, mientras que para $Pi-NaHCO_3$ y $Po-NaHCO_3$ la tendencia opuesta fue predominante (Figura 2). Estas observaciones sugieren que los sistemas de labranza influenciaron diferencialmente el P del suelo biológicamente disponible. La acumulación de fracciones de P biológicamente disponibles en la capa superior del suelo podría ser atribuida al almacenamiento mejorado y el reciclaje de P por mayores contenidos relativamente de MOS en esta zona. Selles et al. (1997) determinaron la distribución de las fracciones de P en un Oxisol en Brasil bajo diferentes sistemas de labranza y encontraron que la acumulación de altos niveles de P biológicamente disponible cerca de la superficie del suelo bajo el sistema 'no labranza', siguió un patrón de distribución similar al de la acumulación de residuos orgánicos en el suelo. El reciclaje de Po está fuertemente controlado por el suministro de P, normalmente mayor en la presencia de materiales orgánicos ricos. Todas las fracciones de P en el suelo, con excepción de $Po-H_2O$, $Po-NaOH$ y Po -sumatoria, mostraron diferencias significativas entre los sistemas agropastoriles (Cuadro 4).

Cuadro 4. Efecto de cinco sistemas agropastoriles bajo los sistemas 'no labranza' (NL) y labranza mínima (LM) en las fracciones de P del suelo.

Parámetros	Promedio de P (mg/kg)	Nivel de significancia		
		Labranza	Sistema agropastoril	L × A ^a
Po-H ₂ O	4.57	0.0005	0.133	0.507
Pi-resina	18.63	0.950	0.032	0.982
Pi-bicarbonato	24.83	0.077	0.0016	0.897
Po-bicarbonato	10.54	0.0033	0.042	0.964
Pt-bicarbonato	35.36	0.030	0.0022	0.926
Pi-NaOH	103.44	0.371	0.0003	0.986
Po-NaOH	52.70	0.048	0.104	0.111
Pt-NaOH	153.14	0.773	0.0001	0.941
Pt-residual	152.06	0.173	0.0037	0.425
Po-sumatoria	67.81	0.067	0.083	0.090
Pt-sumatoria	366.77	0.405	0.0006	0.990

a. L = labranza, A = agropastoril.

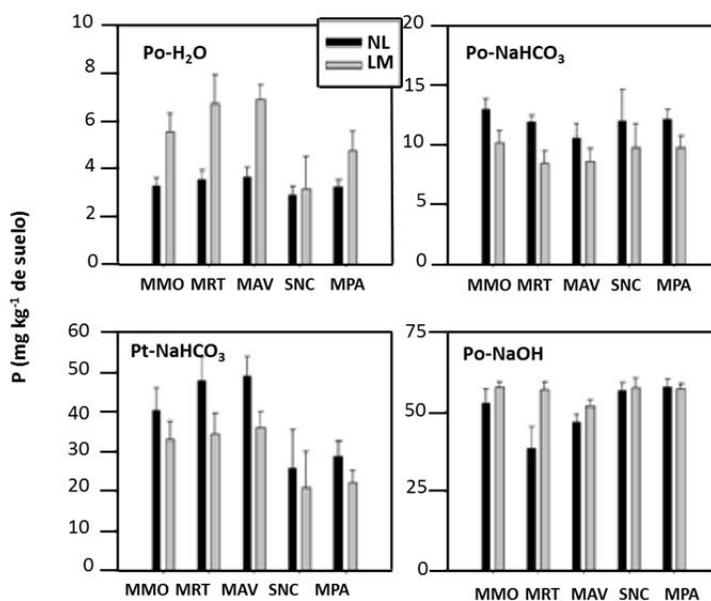


Figura 2. Efecto de los sistemas 'no labranza' (NL) y labranza mínima (LM) en las fracciones de P del suelo de diferentes sistemas agropastoriles. Las barras de error se refieren a los errores estándar de la diferencia en las medias.

Fracciones inorgánicas de P proporcionaron una diferenciación más clara entre los sistemas agropastoriles, y los valores más altos se encontraron generalmente en MAV y MRT, mientras que los valores más bajos se encontraron en SNC y MPA (Figura 3). Como se observó anteriormente, el momento de incorporación del abono verde de la soya durante estación de lluvias, parece haber acelerado la descomposición y mejorado la liberación de nutrientes, incluyendo el P. Se encontró que los suelos tropicales altamente meteorizados contienen minerales como goethita, hematita, gibsita y caolinita (Bartoli et al., 1992) que poseen en la superficie grupos de Fe-OH o de Al-OH, en los cuales el fosfato puede ser retenido y, de esta manera, puede reducir su suministro y disponibilidad (Iyamuremye et al., 1996). Sin embargo, la disponibilidad de P puede ser mejorada si los abonos orgánicos, como el abono verde del cultivo de soya y de residuos de cultivos, son adicionados a estos suelos (Iyamuremye y Dick, 1996; Sánchez et al., 1997). Los sitios de sorción de P de la goethita pueden ser bloqueados por fracciones de materia orgánica, tal como ácidos húmicos, causando que mucho menos P sea retenido. Además, compuestos de bajo peso molecular tales como oxalato y malato pueden tener un efecto similar en el bloqueo de sitios de sorción de P, aunque esos efectos hayan sido encontrado como transitorios, como lo reportan Afif et al. (1995) y Bhatti et al. (1998).

Estos resultados indican que, independientemente del manejo de la labranza, suelos altamente meteorizados pueden incorporar fácilmente P de tratamientos de sistemas de cultivo dentro de la fracción de P residual (Guo et al., 2000). Esto significa que, en el largo plazo, es decir, con más ciclos de cultivo, sistemas de cultivo maíz-leguminosas pueden tener acceso a esta fracción de P en esos suelos.

Los resultados sobre las fracciones de P indican que SNC y MPA pueden ser mejores opciones para el manejo del reciclaje de P, ya que retienen más Po. Este hallazgo ha revelado que la mayor parte del P en los sistemas de producción de SNC y MPA se almacenaba en forma orgánica. Esto puede explicar los valores significativamente bajos de las fracciones de P fácilmente disponibles y moderadamente resistentes (ambas están en las fuentes inorgánicas) observados bajo esos sistemas agropastoriles en este estudio. Por lo tanto, la sabana nativa y las pasturas de gramíneas + leguminosas, en Oxisoles altamente meteorizados y P fuertemente adsorbido, pueden proporcionar una mejor protección de la pérdida de P a través de la fijación, que cuando el P fluye a fuentes inorgánicas de fácil fijación, en comparación con el P en las fuentes orgánicas (Phiri et al., 2001a). Esto confirma nuestros resultados anteriores que indican que en suelos tropicales altamente meteorizados y deficientes en P, la disponibilidad de P para el crecimiento de las plantas puede depender más de los procesos de rotación de la liberación de Pi adsorbido biológicamente (Oberson et al., 2001).

Fracciones de la materia orgánica del suelo

La MOS y sus diferentes fracciones son importantes para la optimización de la producción de cultivos, minimizando los impactos ambientales negativos y mejorando así la calidad del suelo.

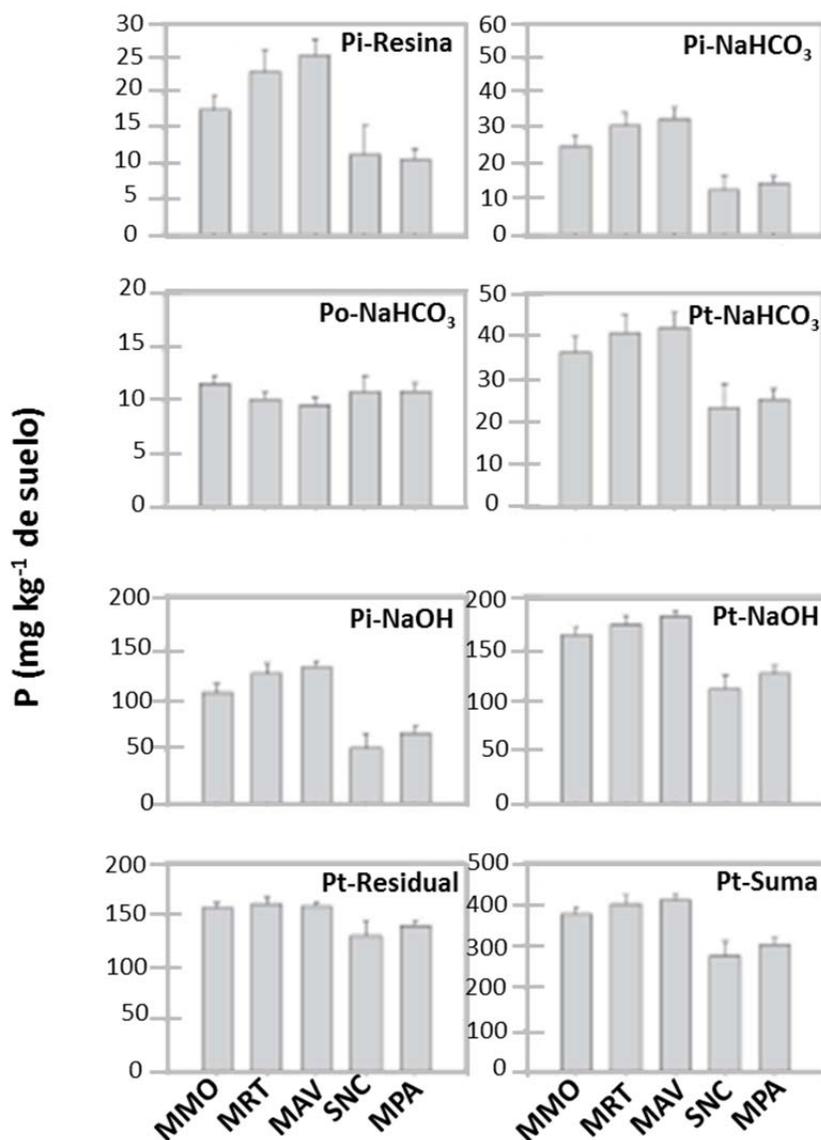


Figura 3. Efecto de los sistemas agropastoriles en las fracciones de P del suelo. Las barras de error se refieren a los errores estándar de la diferencia en las medias.

El fraccionamiento físico de la MOS ha sido útil para distinguir las fuentes específicas de carbono que son sensibles a manejo (Cambardella y Elliot, 1992; Collins et al., 1997). El fraccionamiento por tamaño-densidad de la MOS permite evaluar las fracciones lábiles que son más sensibles a las prácticas de manejo de los cultivos que el contenido de carbono orgánico total (Janzen et al., 1992; Barrios et al., 1996). Mediante el fraccionamiento por tamaño-densidad, descrito por Meijboom et al. (1995), Barrios et al. (1996, 1997) y Phiri et al. (2001b), en esta investigación se recuperaron tres fracciones de la MOS [Ludox ligero (LL), Ludox intermedio (LM) y Ludox pesado (LH)].

Los resultados en la separación por tamaño-densidad de la MOS utilizando Ludox no mostraron ninguna tendencia clara para detectar los efectos de los tratamientos del manejo de labranza o de los sistemas agropastoriles (Cuadro 5), comparados con nuestros estudios anteriores. Si bien la fracción LL ha sido por lo general más sensible al manejo del suelo (Barrios et al., 1996, 1997; Phiri et al., 2001a, 2001b), en este estudio el manejo de la labranza solo generó diferencias significativas para el peso seco de cada una de las fracciones, la cantidad de P, el % de C total y % P total, presentado en la fracción intermedia, LM, y para la cantidad de N presentada en la fracción pesada, LH.

En general, los valores más altos de peso seco en la fracción intermedia, LM, se encontraron bajo el manejo LM. Los pesos secos de fracciones de la MOS decrecieron en el orden $LL > LM > LH$. Los resultados difieren de los encontrados por Barrios et al. (1996, 1997) en Alfisoles de Kenia y Zambia, respectivamente, quienes encontraron decrecimientos de las fracciones en el siguiente orden $LL > LH > LM$. Sin embargo, mientras nuestros valores de peso seco para la fracción LL fueron aproximadamente el doble de los reportados para estos suelos tropicales de África, nuestros valores de la fracción LH fueron ocho veces más bajos. Las diferencias en la recuperación de fracciones de la MOS pueden ser atribuidas a las diferencias en manejo y en el tipo de suelo (Hairiah et al., 1996). Además, el impacto del operario (investigador/técnico) no se puede pasar por alto, como las diferencias en los procesos de lavado y decantación previos a la separación y recolección de la materia macroorgánica del suelo, así como durante la recolección de las fracciones de la MOS a partir de la solución de Ludox. Todo lo anterior puede afectar a la cantidad recuperada (Basamba et al., 2007). Las cantidades más altas de la fracción LL de la MOS confirman los resultados anteriores de investigadores, donde la fracción LL es fundamental en la dinámica de los nutrientes del suelo (Janzen et al., 1992; Boone, 1994; Barrios et al., 1997; Phiri et al., 2001b). Además, nuestros resultados muestran que la fracción LH hace una contribución muy pequeña al total de la MOS, como fue reportada antes por varios investigadores (Hairiah et al., 1996; Barrios et al., 1997; Phiri et al., 2001b) y, por lo tanto, tiene muy poca importancia en la dinámica de nutrientes del suelo. No se encontraron diferencias estadísticas para las interacciones entre manejo de labranza y sistemas y sistemas agropastoriles, excepto para el caso de peso seco de la fracción LM.

El manejo de la labranza generó diferencias significativas en las fracciones de P del suelo y también en la cantidad de P en la fracción LM. La cantidad de P se encontró significativamente y negativamente relacionada con $P_o\text{-NaOH}$ ($r = -0.995$, $P < 0.001$) y la sumatoria de P_o ($r = -0.927$, $P < 0.05$). Aunque estos resultados muestran una evidencia adicional de la relación entre el P y las fracciones de MOS, nuestros resultados anteriores mostraron que la cantidad de P en la fracción LM estuvo significativamente relacionada con $P_i\text{-NaHCO}_3$ y $P_o\text{-NaHCO}_3$ (Phiri et al., 2001a, 2001b).

Cuadro 5. Efecto de cinco sistemas agropastoriles bajo los manejos 'no labranza' (NL) y labranza mínima (LM) en fracciones de la materia orgánica del suelo determinadas con Ludox.

Parámetros	Tratamientos promedio				Nivel de significancia										
					LL ^a				LM ^a				LH ^a		
	LL	LM	LH		L ^b	A ^b	L × A	L	A	L × A	L	L	A	L × A	L × A
Peso seco (g/kg suelo)	2.05	0.42	0.11		0.611	0.226	0.395	0.045	0.863	0.045	0.805	0.037	0.489		
Cantidad (mg/kg suelo)															
C	894.7	164.3	31.5		0.666	0.251	0.442	0.0568	0.856	0.546	0.637	0.066	0.690		
N	25.90	5.37	1.30		0.913	0.347	0.156	0.472	0.728	0.429	0.016	0.066	0.656		
P	2.36	0.59	0.22		0.252	0.160	0.162	0.0387	0.766	0.255	0.726	0.0863	0.744		
C suelo (% del total)	3.35	0.64	0.12		0.260	0.114	0.368	0.0065	0.690	0.421	0.130	0.0761	0.508		
N suelo (% del total)	1.42	0.29	0.074		0.392	0.174	0.186	0.0764	0.392	0.174	0.127	0.0136	0.366		
P suelo (% del total)	0.62	0.17	0.065		0.148	0.838	0.106	0.0054	0.567	0.261	0.249	0.327	0.827		

a. LL = fracción liviana-Ludox (>150 μ m, <1.13 g/cm³); LM = fracción mediana-Ludox (>150 μ m, <1.13–1.37 g/cm³); LH = fracción pesada-Ludox (>150 μ m, >1.37 g/cm³).

b. L = labranza; A = agropastoril.

La relación negativa encontrada indica que la cantidad de P en fracción LM incrementa significativamente a medida que disminuyen los niveles de Po-NaOH. Este hallazgo sugiere que en los suelos en los tratamientos de los sistemas evaluados, especialmente bajo el manejo LM, el P disponible del suelo parece tener una contribución moderadamente importante a corto plazo en inmovilización/mineralización y dinámica de P.

Los porcentajes de C total y P total representados en la fracción LM fueron también significativamente influenciados por los sistemas de labranza en este estudio. Sin embargo, es probable que la contribución de fracción LM a la dinámica de nutrientes sea limitada debido a que representa menos del 0.8% del C total y 0.2% del P total del suelo. El mismo argumento se aplica a la cantidad de N en la fracción LH. Estos resultados concuerdan con Freixo et al. (2002) y Bessam y Mrabet (2003), en que los sistemas 'no labranza' en suelos altamente meteorizados producen MOS de alta calidad en el largo plazo, especialmente cuando las leguminosas son incorporadas dentro de los sistemas de cultivo. Las cantidades de C, N y P disminuyeron en el orden LL > LM > LH. Esto concuerda con los resultados de Phiri et al. (2001b) y Basamba et al. (2007), quienes observaron una tendencia similar en la disminución de las cantidades de los nutrientes en las fracciones de MOS en Andisoles del departamento del Cauca en Colombia. Sin embargo, entre el cultivo y los tratamientos de pasturas estudiados, los resultados fueron bastante irregulares y ningún tratamiento fue claramente dominante en cuanto a la calidad de las fracciones de MOS. Por lo tanto, ninguna tendencia ha sido identificada.

Rendimiento del grano de maíz

En el ciclo de cultivo del 2001, el rendimiento promedio de grano de maíz bajo NL (3.07 t/ha) fue menor que bajo LM (3.61 t/ha), como se muestra en el Cuadro 6. Estos resultados contrastan con el ciclo de cultivo del año 2000, cuando el rendimiento promedio de grano de

Cuadro 6. Efecto de los sistemas 'no labranza' (NL) y labranza mínima (LM) en el rendimiento de grano de maíz bajo diferentes tratamientos agropastoriles.

Sistema agropastoril	Rendimiento de grano de maíz (t/ha)	
	NL	LM
MMO	3.19	3.59
MRT	3.18	4.01
MAV	4.03	4.35
SNC	2.12	2.49
MPA	2.85	3.58
SED ^a	0.21	0.43

a. Error estándar de la diferencia de medias.

maíz para NL fue de 3.57 t/ha, considerablemente mayor que en LM (2.47 t/ha), como lo reportó Basamba et al. (2006). La diferencia observada en los rendimientos de grano entre los primeros 2 años después de la conversión a NL o LM no es sorprendente. Se ha reportado que la transición de labranza convencional a sistemas 'no labranza' a menudo crea cambios en los rendimientos de los cultivos durante años iniciales después de la conversión, presumiblemente como resultado de diferencias en la dinámica de inmovilización/mineralización de nutrientes (Karlen et al., 1994; Sims et al., 1998; Díaz-Zorita y Grove, 2002). No obstante, bajo ambos sistemas de labranza, los tratamientos de MAV y SNC dieron los rendimientos más altos y más bajos de grano de maíz, respectivamente.

Dentro del sistema 'no labranza', el tratamiento MAV produjo rendimiento de grano de maíz significativamente mayor, en comparación con los otros tratamientos agropastoriles. La tendencia fue $MAV > MMO = MRT > MPA > SNC$. Los valores de rendimiento de grano de maíz variaron entre 2.12 t/ha (bajo SNC) y 4.03 t/ha (en MAV) (Cuadro 5). Bajo el sistema de LM, de nuevo MAV, junto con MMO, MRT y MPA, produjeron rendimientos de grano de maíz significativamente más altos, en comparación con el tratamiento de SNC. La tendencia fue $MAV = MRT > MMO = MPA > SNC$, y los valores de rendimiento de grano de maíz estuvieron entre 2.49 t/ha (bajo SNC) y 4.35 t/ha (bajo MAV). Los mayores rendimientos de grano de maíz bajo MAV pueden ser atribuidos a los niveles más altos de nutrientes, especialmente de N total en el suelo y de P fácilmente disponible, que fueron observados en este estudio para este tratamiento.

Además, el cultivo de soya pudo haber aumentado la productividad de este tratamiento debido al incremento del N biológicamente fijado bajo esta leguminosa de grano (CIAT, 1995). La incorporación de leguminosas en la etapa de máxima productividad de biomasa como MAV, especialmente hacia el final de época lluviosa (Cuadro 1), podría haber dado lugar a la liberación de nutrientes producto de la descomposición del abono verde (materia orgánica). Este factor pudo haber mejorado el estado de fertilidad del suelo de las parcelas bajo tratamiento MAV, ocasionando rendimientos de grano de maíz significativamente más altos en ambos sistemas de labranza. El tratamiento SNC dio los rendimientos más bajos de grano de maíz en ambos sistemas de labranza, posiblemente debido al problema de la toxicidad por Al en estos suelos. Se han reportado valores cercanos al 90% para saturación de Al en suelos ácidos de las sabanas de Colombia (CIAT, 1995). Este nivel alto de saturación de Al puede tener un impacto negativo en el rendimiento del maíz, haciendo que los principales nutrientes del suelo, en particular P, no estén disponibles para el crecimiento del cultivo (Pezzarossa et al., 1995; Ernani et al., 2002).

Conclusiones

Las características químicas fueron, en promedio, mejores bajo el sistema 'no labranza', comparadas con los suelos bajo labranza mínima. Las fracciones de P en general también fueron más altas bajo tratamientos de 'no labranza'. No hubo una tendencia específica o

tratamiento dominante en cuanto a los pesos y contenido en nutrientes de las fracciones de MOS. Siete años después del establecimiento de los sistemas agropastoriles del Ensayo a largo plazo, la labranza mínima resultó en un rendimiento del grano de maíz ligeramente mayor, en comparación con el sistema 'no labranza'. Los resultados de este estudio indican que los sistemas en rotación (maíz-soya incorporada como abono verde y la pastura establecida mediante el cultivo de maíz) mejoraron las condiciones del suelo al implementar la práctica de sistemas de labranza mínima en Oxisoles de sabanas colombianas. Las investigaciones futuras deberían centrarse en integrar enfoques que combinen parámetros biofísicos y socioeconómicos para evaluar la productividad sostenible de los Oxisoles de sabanas colombianas.

Agradecimientos

Agradecemos sinceramente el apoyo parcial de la Dirección de Suelos, Agua y Nutrientes (SWNM,) Programa Sistémico del Grupo Consultivo para la Investigación Agrícola Internacional (CGIAR), al primer autor por llevar a cabo parte de su tesis de doctorado en el Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT). También agradecemos el apoyo financiero que el autor principal recibió de Lanekassen (Noruega) y de la Universidad de Makerere (Uganda). Asimismo, agradecemos al Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural (MADR) del Gobierno de Colombia, por la financiación parcial de esta investigación. También estamos muy agradecidos con el investigador Jaime Bernal, de la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (Corpoica), C.I. La Libertad, por la colaboración activa durante este trabajo. Nuestro sincero agradecimiento a la Sra. Anne-Grethe Kolnes, del Departamento de Ciencias Vegetales y Ambientales de la Universidad Agrícola de Noruega (NLH); a Mariela Rivera, Juan Guillermo Cobo y Eloina Mesa, del CIAT, por su ayuda con los análisis estadísticos; también a Gonzalo Borrero, Gloria Marcela Rodríguez, Gloria Constanza Romero y a Isabel Corrales Irlanda, todos del CIAT, por su generoso apoyo técnico.

Referencias

- Afif E; Barrón V; Torrent J. 1995. Organic matter delays but does not prevent phosphate sorption by Cerrado soils from Brazil. *Soil Science* 159:207–211.
- Amézquita E; Friesen D; Rivera M; Rao IM; Barrios E; Jiménez JJ; Decaëns T; Thomas RJ. 2002. Sustainability of crop rotation and ley pasture systems on the acid-soil savannas of South America. En: *Proceedings of the 17th World Congress of Soil Science, Bangkok, Tailandia, 14–21 agosto 2002*.
- Anderson JM; Ingram JSI, eds. 1993. *Tropical soil biology and fertility: A handbook of methods*. 2a. ed. CAB International, Wallingford, Reino Unido. 221 p.
- Barnett V; Payne R; Steiner R, eds. 1995. *Agricultural sustainability: Economic, environmental and statistical considerations*. Wiley, Nueva York, Estados Unidos. 266 p.

- Barrios E; Buresh RJ; Sprent JI. 1996. Organic matter in soil particle size and density fractions from maize and legume cropping systems. *Soil Biology & Biochemistry* 28(2):185–193.
- Barrios E; Buresh RJ; Kwesiga F; Sprent JI. 1997. Light fraction soil organic matter and available nitrogen following trees and maize. *Soil Science Society of America Journal* 61(3):826–831.
- Bartoli F; Burtin G; Guerif J. 1992. Influence of organic matter on aggregation in Oxisols rich in gibbsite or in goethite. II. Clay dispersion, aggregate strength and water stability. *Geoderma* 54:259–274.
- Basamba TA; Amézquita E; Singh BR; Rao IM. 2006. Effects of tillage systems on soil physical properties, root distribution and maize yield on a Colombian acid-savanna Oxisol. *Acta Agriculturae Scandinavica B* 56(4):255–262.
- Basamba T; Barrios E; Singh B; Rao I. 2007. Impact of planted fallows and a crop rotation on nitrogen mineralization and phosphorus and organic matter fractions on a Colombian volcanic-ash soil. *Nutrient Cycling Agroecosystems* 77(2):127–141.
- Beck MA; Sánchez PA. 1994. Soil phosphorus fraction dynamics during 18 years of cultivation on a Typic Paleudult. *Soil Science Society of America Journal* 58(5):1424–1431.
- Bessam F; Mrabet R. 2003. Long-term changes in soil organic matter under conventional tillage and no-tillage systems in semiarid Morocco. *Soil Use and Management* 19(2):139–143.
- Bhatti JS; Comerford NB; Johnston CT. 1998. Influence of oxalate and soil organic matter on sorption and desorption of phosphate onto a spodic horizon. *Soil Science Society of America Journal* 62(4):1089–1095.
- Boone RD. 1994. Light-fraction soil organic matter: Origin and contribution to net nitrogen mineralization. *Soil Biology & Biochemistry* 26(11):1459–1468.
- Cambardella CA; Elliot ET. 1992. Particulate soil organic matter changes across a grassland cultivation sequence. *Soil Science Society of America Journal* 56:777–783.
- Carter MR. 1993. *Soil sampling and methods of analysis*. Lewis Publishers, Boca Raton, FL, Estados Unidos. 823 p.
- CIAT (Centro Internacional de Agricultura Tropical). 1995. Tropical Lowlands Program; Annual Report 1994. Working Document No. 148. Cali, Colombia. p 258.
- Collins HP; Paul EA; Paustian K; Elliot ET. 1997. Characterisation of soil organic carbon relative to its stability and turnover. En: Paul EA; Elliot ET; Paustian K; Cole CV, eds. *Soil organic matter in temperate agroecosystems: Long-term experiments in North America*. CRC Press, Boca Raton, FL, Estados Unidos. p 51–72.
- Cross AF; Schlesinger WH. 1995. A literature review and evaluation of the Hedley fractionation: Applications to the biogeochemical cycle of soil phosphorus in natural ecosystems. *Geoderma* 64:197–214.

- Díaz-Zorita M; Grove JH. 2002. Duration of tillage management affects carbon and phosphorus stratification in phosphatic Paleudalfs. *Soil & Tillage Research* 66(2):165–174.
- Doran JW; Parkin TB. 1994. Defining and assessing soil quality. En: Doran JW; Coleman DC; Bezdicek DF; Stewart BA, eds. *Defining soil quality for a sustainable environment*. SSSA special publication No. 35. Soil Science Society of America, American Society of Agronomy, Madison, WI, Estados Unidos. p 3–21.
- Ernani PR; Bayer C; Maestri L. 2002. Corn yield as affected by liming and tillage system on an acid Brazilian Oxisol. *Agronomy Journal* 94:305–309.
- Fixen PE; Grove JH. 1990. Testing soils for phosphorus. En: Westerman RL, ed. *Soil testing and plant analysis*. Soil Science Society of America (SSSA), Madison, WI, Estados Unidos. p 141–180.
- Fontes MPF; Weed SB. 1996. Phosphate adsorption by clays from Brazilian Oxisols: Relationship with specific surface area and mineralogy. *Geoderma* 72:37–51.
- Freixo AA; Machado PLOA; Santos HP; Silva CA; Fadigas FS. 2002. Soil organic carbon and fractions of a Rhodic Ferrasol under the influence of tillage and crop rotation systems in southern Brazil. *Soil & Tillage Research* 64:221–230.
- Friesen DK; Rao IM; Thomas RJ; Oberson A; Sanz JI. 1997. Phosphorus acquisition and cycling in crop and pasture systems in low fertility tropical soils. *Plant and Soil* 196(2):289–294.
- Friesen D; Thomas R; Rivera M; Asakawa N; Bowen W. 1998. Nitrogen dynamics under monocultures and crop rotations on a Colombian savanna Oxisol. En: *Proceedings of the 16th World Congress of Soil Science on CD-ROM*. Association française pour l'étude du sol, Montpellier, Francia.
- Guimarães EP; Sanz JI; Rao IM; Amézquita E. 2004. Research on agropastoral systems: What we have learned and what we should do. En: Guimarães EP; Sanz JI; Rao IM; Amézquita MC; Amézquita E; Thomas RJ, eds. *Agropastoral systems for the tropical savannas of Latin America*. Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), Cali, Colombia; Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa), Brasília, DF, Brasil. p 326–336.
- Guo F; Yost RS. 1998. Partitioning soil phosphorus into three discrete pools of differing availability. *Soil Science* 163(10):822–833.
- Guo F; Yost RS; Hue NV; Evensen CI; Silva A. 2000. Changes in phosphorus fractions in soils under intensive plant growth. *Soil Science Society of America Journal* 64:1681–1689.
- Hairiah K; Latif AR; van Noordwijk M. 1996. Soil organic matter fractionation under different land use types in N. Lampung. *Agrivita* 19(4):146–149.
- Hedley MJ; Stewart JWB; Chauhan BS. 1982. Changes in inorganic and organic soil phosphorus fractions induced by cultivation practices and by laboratory incubations. *Soil Science Society of America Journal* 46:970–976.

- Hinsinger P. 2001. Bioavailability of soil inorganic P in the rhizosphere as affected by root-induced chemical changes: A review. *Plant and Soil* 237:173–195.
- Iyamuremye F; Dick RP. 1996. Organic amendments and phosphorus sorption by soils. *Advances in Agronomy* 56:139–185.
- Iyamuremye F; Dick RP; Baham J. 1996. Organic amendment and phosphorus dynamics. II. Distribution of soil phosphorus fractions. *Soil Science* 161(7):436–443.
- Janzen HH; Campbell CA; Brandt SA; Lafond GP; Townley-Smith L. 1992. Light-fraction organic matter in soils from long-term crop rotations. *Soil Science Society of America Journal* 56:1799–1806.
- Karlen DL; Wollenhaupt NC; Erbach DC; Berry EC; Swan JB; Eash NS; Jordahl JL. 1994. Long-term tillage effects on soil quality. *Soil & Tillage Research* 32:313–327.
- Lal R. 1997. Residue management, conservation tillage and soil restoration for mitigating greenhouse effect by CO₂-enrichment. *Soil & Tillage Research* 43:81–107.
- Linquist BA; Singleton PW; Cassman KG. 1997. Inorganic and organic phosphorus dynamics during a build-up and decline of available phosphorus in an Ultisol. *Soil Science* 162:254–264.
- Meijboom FW; Hassink J; van Noordwijk M. 1995. Density fractionation of soil macroorganic matter using silica suspensions. *Soil Biology & Biochemistry* 27:1109–1111.
- Murphy J; Riley JP. 1962. A modified single solution method for determination of phosphate in natural waters. *Analytica Chimica Acta* 27:31–36.
- Oberson A; Friesen DK; Rao IM; Buhler S; Frossard E. 2001. Phosphorus transformations in an Oxisol under contrasting land use systems: The role of the soil microbial biomass. *Plant and Soil* 237:197–210.
- Olsen SR; Sommers LE. 1982. Phosphorus. En: Page AL; Miller RH; Keeney DR, eds. *Methods of soil analysis. Part 2: Chemical and microbiological properties. Agronomy 9, Part 2. 2nd ed.* American Society of Agronomy and Soil Science Society of America, Madison, WI, Estados Unidos. p 403–430.
- Pezzarossa B; Barbaferi M; Benetti A; Petruzzelli G; Mazzoncini M; Bonari E; Pagliai M. 1995. Effects of conventional and alternative management systems on soil phosphorus content, soil structure, and corn yield. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 26 (17/18):2869–2885.
- Phiri S; Amézquita E; Rao IM; Singh BR. 2001a. Disc harrowing intensity and its impact on soil properties and plant growth of agropastoral systems in the Llanos of Colombia. *Soil & Tillage Research* 62:131–143.
- Phiri S; Barrios E; Rao IM; Singh BR. 2001b. Changes in soil organic matter and phosphorus fractions under planted fallows and a crop rotation system on a Colombian volcanic-ash soil. *Plant and Soil* 231:211–223.

- Phiri S; Amézquita E; Rao IM; Singh BR. 2003a. Constructing an arable layer through chisel tillage and agropastoral systems in tropical savanna soils of the Llanos of Colombia. *Journal of Sustainable Agriculture* 23(1):5–29.
- Phiri S; Rao IM; Barrios E; Singh BR. 2003b. Plant growth, mycorrhizal association, nutrient uptake and phosphorus dynamics in a volcanic-ash soil in Colombia as affected by the establishment of *Tithonia diversifolia*. *Journal of Sustainable Agriculture* 21(3):41–59.
- Picone LI; Zamuner EC; Berardo A; Marino MA. 2003. Phosphorus transformations as affected by sampling date, fertilizer rate and phosphorus uptake in a soil under pasture. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 67(3):225–232.
- Rao IM; Friesen DK; Osaki M. 1999. Plant adaptation to phosphorus-limited tropical soils. En: Pessaraki M, ed. *Handbook of plant and crop stress*. Marcel Dekker, Inc., Nueva York, Estados Unidos. p 61–96.
- Rhoton FE. 2000. Influence of time on soil response to no-till practices. *Soil Science Society of America Journal* 64:700–709.
- Roth CH; Vieira MJ; Derpsch R; Meyer B; Frede H-G. 1987. Infiltrability of an Oxisol in Paraná, Brazil as influenced by different crop rotations. *Journal of Agronomy and Crop Science* 159(3):186–191.
- Roth CH; Wilczynski W; Castro Filho C. 1992. Effect of tillage and liming on organic matter composition in a Rhodic Ferralsol from southern Brazil. *Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde* 155(3):175–179.
- Rounsevell MDA; Evans SP; Bullock P. 1999. Climate change and agricultural soils: Impacts and adaptation. *Climate Change* 43(4):683–709.
- Sánchez PA; Shepherd KD; Soule MJ; Place FM; Buresh RJ; Izac AM; Mokwunye AU; Kwasiga FR; Ndiritu CG; Woomer PL. 1997. Soil fertility replenishment in Africa: An investment in natural resource capital. En: Buresh RJ; Sánchez PA; Colhoun F, eds. *Replenishing soil fertility in Africa*. Soil Science Society of America, Madison, WI, Estados Unidos. p 1–46.
- SAS Institute Inc. 1999. *SAS/STAT User's Guide, Version 8*. Cary, NC, Estados Unidos.
- Selles F; Kochhann RA; Denardin JE; Zentner RP; Faganello A., 1997. Distribution of phosphorus fractions in a Brazilian Oxisol under different tillage systems. *Soil & Tillage Research* 44:23–34.
- Sims AL; Schepers JS; Olsen RA; Power JF. 1998. Irrigated corn yield and nitrogen accumulation response in a comparison of no-till and conventional till: Tillage and surface-residue variables. *Agronomy Journal* 90(5):630–637.
- Soil Survey Staff. 1994. *Keys to soil taxonomy*. Pocahontas Press, Blacksburg, VA, Estados Unidos.

Thomas RJ; Rondón MA; Amézquita E; Ayarza MA; Asakawa N; Friesen D. 2004. Overcoming soil constraints in Latin American savannas: New approaches and potential trade-offs. En: Guimarães EP; Sanz JI; Rao IM; Amézquita MC; Amézquita E; Thomas RJ, eds. Agropastoral systems for the tropical savannas of Latin America. Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), Cali, Colombia; Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa), Brasília, DF, Brasil. p 309–325.

Tiessen H; Moir JO. 1993. Characterization of available P by sequential extraction. En: Carter MR, ed. Soil sampling and methods of analysis. Lewis Publishers, Boca Raton, FL, Estados Unidos. p 75–86.

Dinámicas de Nitrógeno en Monocultivos y Cultivos en Rotación en Oxisoles de los Llanos Orientales de Colombia

D. Friesen¹, R. Thomas², M. Rivera³, N. Asakawa⁴ y W. Bowen⁵

Resumen

En un Oxisol clasificado como Typic Haplustox Isohipertérmico caolinítico en el Centro Nacional de Investigación (CNI) en Carimagua, Llanos Orientales de Colombia, se estudiaron las dinámicas de N en los cultivos de arroz y maíz en monocultivo y en rotaciones con leguminosas incorporadas como abonos verdes, para determinar la eficiencia en el uso y el destino del N derivado de fuentes orgánicas e inorgánicas. El N recuperado por los cultivos a partir de los residuos de cosecha fue bajo (7–14%), mientras que el recuperado de los fertilizantes fue más alto (26–50% en biomasa). Las mediciones secuenciales de las concentraciones de N-mineral en el perfil del suelo mostraron una alta acumulación del contenido de nitratos (NO_3^-) a 1 m de profundidad, siendo cinco o seis veces mayor que en suelos de sabana nativa en condición natural, durante la época seca. Durante la época lluviosa se observó un movimiento significativo de NO_3^- a través del perfil del suelo, tanto en las rotaciones como en los monocultivos. El modelo de simulación CERES-Rice predijo la producción y la lixiviación de NO_3^- cuando se consideró la retención de aniones.

Palabras claves: abonos inorgánicos, fertilizantes nitrogenados, cultivos secuenciales, mineralización, eficiencia de uso de N

Introducción

Después del P, el N es el nutriente más limitante en la producción agrícola en Oxisoles isohipertérmicos de las sabanas de América del Sur. La producción de cultivos en estos suelos depende de las entradas de N a partir de los fertilizantes y/o del N derivado de las leguminosas

-
1. Química de suelos/Agronomía, Consultor Internacional, Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo (CIMMYT), Addis Ababa, Etiopía. d.friesen@cgiar.org
 2. United Nations University, International Network on Water, Environment and Health (UNU-INWEH), Hamilton, Ontario, Canadá. contact@inweh.unu.edu
 3. Física de suelos/Agronomía, Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), Cali, Colombia. m.rivera@cgiar.org
 4. Microbiología de suelos, CIAT. n.asakawa@cgiar.org
 5. University of Florida, IFAS, International Programs, Gainesville, FL, Estados Unidos. wbowen@ufl.edu

utilizadas en los sistemas de rotación. El uso eficiente de las fuentes de N orgánico e inorgánico es el resultado neto de la dinámica de este elemento en el sistema, y es afectado tanto por las características intrínsecas de las fuentes (fertilizantes, residuos de leguminosas) y de los reservorios de N en el suelo (extracción de cultivos), como por los factores ambientales (temperatura, humedad, entre otros) que rigen las tasas de estos procesos. Las tasas de descomposición y liberación de N de los residuos de cultivos y abonos verdes dependen de su composición (proporción C:N, contenido de lignina y polifenoles) (Palm y Sánchez, 1991) y de la temperatura del suelo, la humedad y la interacción de los residuos con el suelo que, a la vez, son afectados por el manejo. El N liberado de las fuentes orgánicas puede perderse del sistema por las mismas vías —volatilización como amonio, denitrificación de nitratos y lixiviación— que reducen la eficiencia del N proveniente de fertilizantes. La sincronización de la demanda del cultivo con la tasa de descomposición de los residuos es de fundamental importancia para el uso eficiente del N proveniente de abonos verdes como leguminosas, coberturas y residuos (Swift, 1984). Debido a la dependencia que tiene la dinámica del N en el sistema suelo-planta de factores externos no-controlables, del efecto neto del N del fertilizante y del manejo de los residuos, la respuesta del cultivo a las entradas de este nutriente al sistema varía de un sitio a otro y a través del tiempo. Los modelos de simulación de la dinámica de los cultivos, entre ellos CERES-Crop (Bowen et al., 1995), integran los procesos de crecimiento del cultivo, los suministros y demandas de N, los efectos del suelo y las condiciones de clima. La aplicación de estos modelos para cuantificar los procesos dinámicos y sus interacciones aseguran un manejo más eficiente de las entradas al sistema de las diferentes formas de N orgánicas e inorgánicas (Bowen y Baethgen, 1998).

En este capítulo se presentan los flujos de N proveniente de fertilización y rotación de cultivos en un Oxisol franco arcilloso de los Llanos Orientales de Colombia. Se emplea un modelo de simulación para el estudio de la dinámica de este nutriente en el suelo.

Materiales y métodos

Los estudios se realizaron en el Ensayo Culticore, establecido en 1993 en Oxisoles franco arcillosos bien drenados, dentro del Convenio CIAT-Corpoica (Centro Internacional de Agricultura Tropical-Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria), en el Centro Nacional de Investigación (CNI) en Carimagua, Llanos Orientales de Colombia, a 4° 37' N, 71° 19' O, 175 m.s.n.m. y precipitación anual de 2240 mm, distribuidos entre abril y noviembre.

Se utilizó un diseño bloques al azar con cuatro repeticiones, tanto para los sistemas con base en el cultivo de arroz como los sistemas de maíz (ver Capítulo 4 de esta obra). En estas parcelas se evaluaron los efectos de los sistemas de cultivo en varias propiedades y procesos del suelo, incluyendo el reciclaje de nutrientes. Adicional a los monocultivos se establecieron rotaciones de arroz-caupí y maíz-soya, leguminosas incorporadas como abonos verdes y sistemas de pasturas con leguminosas forrajeras mejoradas, establecidas mediante los cultivos de arroz y/o maíz. Como testigos se incluyeron parcelas de sabana nativa. Los sistemas que

incluían arroz y maíz fueron enclados con dosis de 500 y 2000 kg/ha de cal dolomita, respectivamente, antes del establecimiento, y mantenidos después con aplicaciones anuales de 200 kg/ha. Como fuente de N se utilizó urea fraccionada en tres aplicaciones para arroz (20, 30 y 30 kg/ha de N) y en dos para el maíz (40 y 80 kg/ha de N). Igualmente, a la siembra en las leguminosas se aplicaron 20 kg/ha de N y nutrientes como P, K, Mg, S y Zn en dosis adecuadas para el desarrollo de estos cultivos.

La tasa de recuperación del N aplicado como fertilizante se determinó usando urea marcada con ^{15}N en microparcels protegidas de 1.0×1.0 m para arroz y 2.25×2.0 m para maíz, cada una de ellas con tres surcos del cultivo correspondiente e instaladas en las parcelas experimentales principales (Saffigna, 1988) —una microparcels por cada dosis de aplicación. Las muestras para determinar la producción se tomaron de la parte central de las microparcels al momento de la maduración del cultivo y separadas en grano, biomasa de residuos de cultivo (soca) y malezas. Las muestras de suelo para análisis se tomaron cada 15 hasta 60 cm de profundidad en el suelo mediante la construcción de calicatas de 30 cm de profundidad en la parte central de los surcos y con un barreno a mayores profundidades. Las raíces de las muestras de suelo se extrajeron manualmente y se secaron en estufa a $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ hasta obtener peso constante, antes de determinar la producción de materia seca. Las concentraciones de N total y ^{15}N para el material vegetal y el suelo se determinaron por combustión de muestras, mediante un espectrómetro de masas de flujo continuo de isótopos (Europa Scientific, Roboprep-Tracermass).

Para el estudio de la tasa de descomposición de los residuos de cultivos, abonos verdes y materia muerta (hojarasca) del forraje recolectado en las parcelas de campo se utilizó la técnica estándar de bolsas de descomposición de hojarasca (Thomas y Asakawa, 1993). Para ello se utilizó un grupo de seis bolsas replicadas cuatro veces que contenían 10 g de peso seco de material vegetal, que se colocaron en la superficie del suelo y cubiertas con material vegetal similar o enterradas a 5 cm de profundidad en el suelo en cada tratamiento. En las fechas de muestreo se removió una muestra de cada material vegetal por cada grupo de bolsas, la cual fue lavada, secada y analizada para materia seca y contenido de nutrientes (Thomas y Asakawa, 1993). La tasa de liberación de N y la vida media de éste se calcularon usando el modelo exponencial de descomposición: $X = X_0 \times \exp^{-kt}$, donde X es la cantidad remanente de N, X_0 es la cantidad inicial de N, k es la tasa constante para la liberación de N y t es tiempo.

El destino del N derivado de los residuos de cultivos y abonos verdes se evaluó usando materiales marcados con ^{15}N producidos en materas suplementadas con sulfato de amonio marcado. La recuperación de ^{15}N a partir de residuos de incorporación por cultivos subsiguientes, como también su destino en el suelo a 40 cm de profundidad, se determinó en microparcels. El muestreo y los procedimientos analíticos fueron similares a los descritos anteriormente.

La dinámica de N-mineral en el perfil del suelo se determinó por muestreos periódicos usando un barreno hidráulico con tubo de acero de 5 cm de diámetro y 1 m de longitud, con un tubo plástico en el interior. En cada parcela experimental se tomaron al azar 10 puntos (cilindros) y en cada uno de ellos dos submuestras cada 10 cm hasta 20 cm, y cuatro submuestras cada 20 cm hasta 100 cm de profundidad en el suelo, que fueron mezcladas por profundidades. Las submuestras se colocaron en bolsas de plástico, selladas y luego almacenadas en un recipiente con hielo para el transporte al laboratorio, donde fueron inmediatamente extractadas con KCl 1 M (Keeney y Nelson, 1982). En cada submuestra se determinó el contenido de humedad; el amonio y los nitratos (NO_3^-) en el extracto se determinaron usando un autoanalizador. Para aplicar el modelo de simulación de cultivos DSSAT se recolectaron, además, datos de clima, suelos y fenología del cultivos (IBSNAT, 1988).

Resultados y discusión

La composición y la vida media en el suelo para el N liberado de los residuos de los cultivos y de los abonos verdes, determinados en bolsas de descomposición, se incluyen en el Cuadro 1. Como lo indican sus desviaciones estándar, se encontró una alta variación entre las épocas seca y lluviosa en las tasas de liberación de N a partir de residuos, especialmente aquellos aplicados en la superficie del suelo. Esta variación entre épocas no fue suficiente para explicar los cambios en la variabilidad de la descomposición. Sin embargo, la alta variabilidad de los residuos en la superficie del suelo, comparativamente con los residuos colocados a mayor profundidad, sugiere un alto efecto de factores ambientales como variaciones interestacionales en temperatura y especialmente del grado de humedad en la superficie del suelo. Como era de esperar, por sus composiciones, las tasas de liberación de N fueron mayores a partir de abonos verdes que a partir de los residuos de cosecha de los cultivos. Sin embargo, ninguna de las proporciones C/N y lignina/N explican las diferencias en las tasas de descomposición y liberación de N observadas entre los residuos de arroz y maíz o entre abonos verdes de caupí y soya.

Cuadro 1. Efecto de la composición y el manejo en la tasa de liberación de N de residuos de cultivos y abonos verdes en un Oxisol^a, Llanos Orientales de Colombia.

Material aplicado	N (%)	C/N	Lignina/N	Vida media del N liberado (días)	
				Voleo (superficie)	Enterrado (5 cm)
Residuos de arroz	0.93 (0.20)	47 (12)	7.8 (0.7)	79 (70)	39 (16)
Residuos de maíz	0.89 (0.14)	51 (6)	11.9 (3.1)	43 (17)	35 (8)
Abono verde (caupí)	2.90 (0.09)	16 (3)	4.8 (0.8)	32 (15)	12 (2)
Abono verde (soya)	2.39 (0.26)	17 (1)	3.7 (1.1)	36 (11)	18 (1)

a. Valores promedio de tres y dos períodos para arroz y maíz, respectivamente. (Desviación estándar.)

Las liberaciones de N a partir de los residuos y abonos verdes fueron muy rápidas (Cuadro 1). Con base en el modelo exponencial simple de descomposición, los abonos verdes liberaron 90% de su N entre 40 y 60 días después de la incorporación. En el caso de residuos de cultivos, el 90% de la liberación de N ocurrió 4 meses después de la incorporación. La rápida liberación del N tiene el riesgo de ocurrencia de pérdidas importantes de este nutriente antes de que los cultivos siguientes se encuentren totalmente establecidos y con capacidad para recuperar el N mineralizado del suelo. Los resultados en experimentos con residuos marcados con ^{15}N muestran valores de recuperación por cultivos entre 9 y 14% con pérdidas entre 15 y 50%; el resto del N se incorporó en los reservorios de N-orgánico del suelo. La recuperación de N a partir de las leguminosas fue mínima, debido a que éstas se descomponen más rápidamente.

En contraste, la recuperación de N a partir de la urea fue mayor en los residuos del cultivo y abono verde (Cuadro 2); entre 25 y 40% de la urea aplicada fue recuperada en la biomasa total (incluyendo raíces y malezas), y aproximadamente entre 34–46% fue encontrada en el suelo a 60 cm de profundidad. La recuperación de N aplicado como fertilizante (fraccionado en tres partes), por la biomasa en los sistemas de arroz fue mayor que la recuperación por el cultivo de maíz, donde la aplicación se hizo fraccionada en dos partes. Parte de esa diferencia se debió a la alta infestación de malezas en los sistemas con arroz. La recuperación deficiente del N derivado de los abonos verdes (incorporados a finales de 1994), por los cultivos de arroz y maíz en 1995, se reflejó en la ausencia de cualquier dilución significativa de N del fertilizante en los sistemas en rotación (abono verde), comparado con los sistemas en monocultivo (Cuadro 2).

Los balances de N en el suelo para sistemas en monocultivo de arroz y en rotación con abono verde se hicieron combinando la recuperación del N por el grano de arroz derivado del fertilizante y del abono verde, así como de la existencia en las reservas en el suelo y la cantidad de N reciclado a partir de los residuos de arroz (Cuadro 3). Esas estimaciones indican que aun con fertilizantes y abono verde, en estos sistemas ocurre una extracción neta de las reservas del

Cuadro 2. Recuperación total de N del fertilizante (urea) en grano y residuos de cosecha y en el perfil del suelo a cosecha en monocultivos y en rotación con abonos verdes (AV) en un Oxisol, Llanos Orientales de Colombia.

Reservorio N	Sistemas - Arroz		Sistemas - Maíz	
	Monocultivo	Rotación-AV	Monocultivo	Rotación-AV
	% aplicado		% aplicado	
Arroz grano	7	9	14	19
Soca-raíces-malezas	31	30	11	12
Suelo (0–60 cm)	45	46	44	34
Total recuperado	84	85	70	65

Cuadro 3. Balance de N estimado en un Oxisol cultivado con arroz monocultivo y en rotación con abono verde (AV) en un Oxisol, Llanos Orientales de Colombia.

Entradas/salidas reservorios N	Arroz monocultivo	Rotación arroz-AV
	Balance de N (kg/ha)	
Residuos de cultivo	+11	+12
Fertilizante (urea)	+20	+19
Abono verde	0	+23
Extracción/planta	-79	-59
Cambio de N en las reservas	-48	-5

N del suelo, aunque en los sistemas en rotación tiende a un mayor equilibrio. Los balances negativos se debieron principalmente a la volatilización y, de gran magnitud, a la lixiviación de N derivado del fertilizante y de los abonos verdes. Las pérdidas totales de N en el sistema monocultivo de arroz y en arroz-abono verde fueron aproximadamente de 80 y 150 kg/ha, respectivamente.

Las mediciones secuenciales de N-mineral en el perfil del suelo durante la época seca en ambos sistemas, tomadas después de la incorporación de residuos de abono verde, mostraron un aumento progresivo de la concentración de N-mineral en los horizontes superficiales, que se movieron a través del perfil del suelo con la caída de las primeras lluvias de la estación lluviosa (Figura 1). La mayor parte de N-mineral se encontró en forma de NO_3^- con un contenido total a 1 m de profundidad, de cinco a seis veces mayor que en suelos de sabana nativa. Las cantidades de N en el perfil del suelo estuvieron cualitativamente relacionadas con el contenido de N en los residuos aplicados. De otra parte, los contenidos de N-mineral en el perfil del suelo entre 0 y 100 cm en los sistemas arroz monocultivo y arroz-abono verde presentaron valores diferentes a los encontrados en sabana nativa antes del establecimiento de arroz en 1994 (entre 40 y 130 kg/ha de N), con pérdidas similares a las estimadas anteriormente (Cuadro 3).

Mediciones similares, tomadas con intervalos de 2 semanas durante la estación de lluvias, indicaron un movimiento significativo de NO_3^- (proveniente tanto de la aplicación de fertilizantes como de los residuos) a través del perfil del suelo en ambos monocultivos y rotaciones (no se muestran los resultados). Este movimiento descendente del N no permitió el aprovechamiento del N reciclado de residuos y abonos verdes para los cultivos siguientes en la rotación. En la cosecha de arroz de septiembre se encontró que la mayor parte del N-mineral se había lixiviado por debajo de 60 cm de profundidad en el suelo (Figura 1).

Cuando se usó el modelo CERES-Rice para evaluar la disponibilidad y el destino del N derivado de los residuos de abonos verdes en el sistema arroz-abono verde, comenzando desde la fecha de incorporación de los residuos, se encontró concordancia entre las tasas observadas y simuladas de liberación de N de caupí incorporado como abono verde (no se muestran los resultados). No obstante, a la mitad de la estación seca —entre la incorporación del abono

Contenido de N-Mineral (kg ha^{-1})

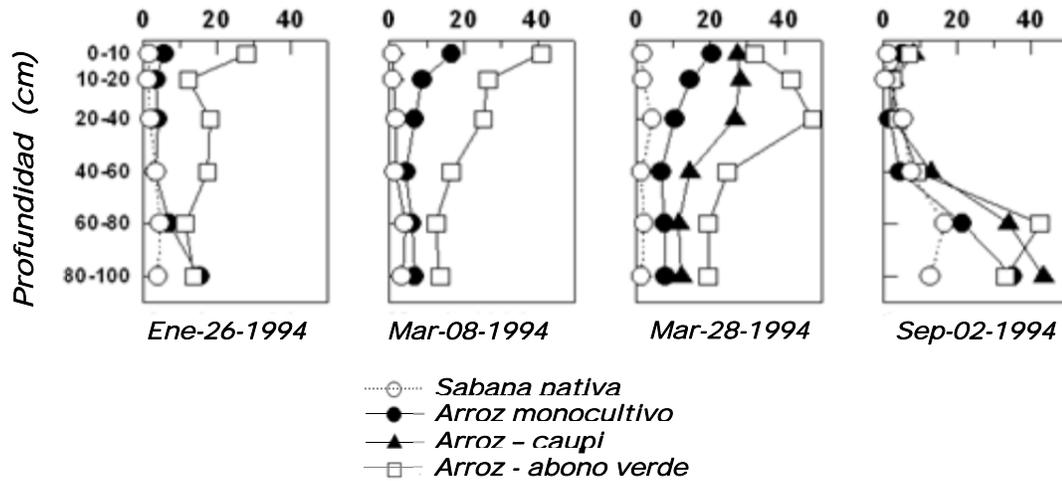


Figura 1. Evolución de las concentraciones del N-mineral en el perfil de un Oxisol, bajo sabana nativa, arroz monocultivo y arroz-rotación caupí (grano y abono verde) a través de la estación seca (enero a marzo) y después de la cosecha de arroz (septiembre). Carimagua, Llanos Orientales de Colombia.

Contenido de N-Mineral (kg ha^{-1})

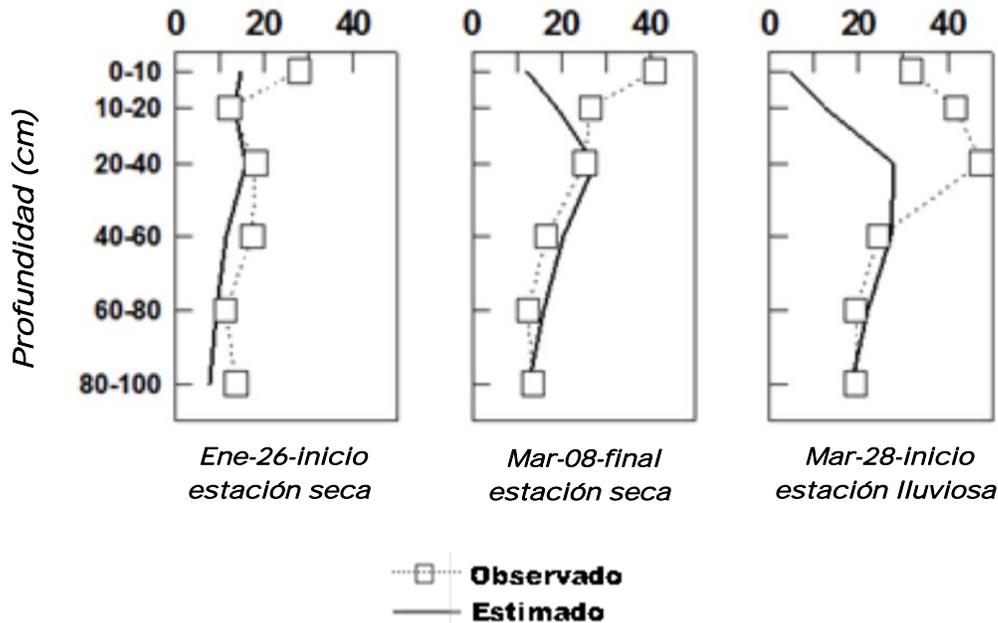


Figura 2. Nitrógeno mineral observado y estimado en el perfil de un Oxisol, bajo la rotación arroz-abono verde a través de la estación seca, seguida de la incorporación (noviembre 19 de 1994). Carimagua, Llanos Orientales de Colombia.

verde y la siembra del arroz—, las concentraciones de N-mineral en el perfil del suelo fueron subestimadas y los flujos a través del perfil sobrestimados (Figura 2); por tanto, las diferencias pueden deberse a la subestimación de las tasas de mineralización de N o a la falta de consideración de los efectos de los cambios positivos de la superficie de los minerales de las arcillas oxídicas en Oxisoles (Wong et al., 1990), lo cual afecta significativamente la retención y transporte de NO_3^- en esos suelos, a un pH cercano de 4.3 (Bowen et al., 1993). Cuando los coeficientes de adsorción se incluyeron en la simulación, la lixiviación de NO_3^- simulada por el modelo estuvo mucho más cercana a los valores observados.

Conclusiones

- El abono verde de leguminosas aporta cantidades significativas de N que es biológicamente fijado en los sistemas de cultivos bajo las condiciones de las sabanas de los Llanos Orientales de Colombia. En estas condiciones, el N es liberado rápidamente al suelo, pero su recuperación por los cultivos es difícil, siendo menos eficiente que los fertilizantes nitrogenados, cuya aplicación puede ser más fácilmente sincronizada con la demanda del cultivo.
- En un ambiente de alta lixiviación, una pobre sincronización de la relación oferta-demanda de N resulta en una lixiviación significativa de NO_3^- por debajo de la zona de enraizamiento del cultivo y en contaminación de las aguas subterráneas.
- Las predicciones de la producción y flujos de NO_3^- en suelos con sistemas de producción de cultivos que involucren leguminosas en rotación ayudan al manejo de los sistemas y permiten minimizar las pérdidas de N, incrementando la eficiencia de la utilización del N por los cultivos.
- El modelo de simulación CERES-Rice predijo los flujos de N en el sistema arroz-abono verde cuando se consideró la retención del anión sobre la superficie de los minerales oxídicos. No obstante, aún es necesarios adelantar ensayos más amplios con abonos verdes con características de descomposición más diversas y suelos con diferentes habilidades para retener NO_3^- .

Agradecimientos

Los autores agradecen a Carlos Guillermo Meléndez, Irlanda Isabel Corrales, Gloria Marcela Rodríguez y a Héctor Fabio Alarcón, por su invaluable asistencia en el trabajo de campo y de laboratorio.

Referencias

- Bowen WT; Baethgen WE 1998. Simulation as a tool for improving nitrogen management. En: Tsuji GY; Hoogenboom G; Thornton PK, eds. Understanding options for agricultural production. Systems approaches for sustainable agricultural development. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Países Bajos. Vol. 7, p 189–204.
- Bowen WT; Jones JW; Carsky RJ; Quintana JO. 1993. Evaluation of the nitrogen submodel of CERES-maize following legume green manure incorporation. *Agronomy Journal* 85(1):153–159.
- Bowen WT; Wilkens PW; Singh U; Thornton PK; Ritchie JT. 1995. A generic CERES cereal model. *Agronomy Abstracts*, American Society of Agronomy, Madison, WI, Estados Unidos. p 62.
- International Benchmark Sites Network for Agrotechnology Transfer (IBSNAT). 1988. Experimental design and data collection procedure for IBSNAT: The minimum data set for systems analysis and crop simulation. 3rd ed. Technical Report 1. Department of Agronomy and Soil Science, University of Hawaii, Honolulu, HI, Estados Unidos.
- Keeney DR; Nelson DW. 1982. Nitrogen—Inorganic forms. En: Page AL; Miller RH; Keeney DR, eds. *Methods of soil analysis. Part 2: Chemical and microbiological properties.* Agronomy 9, Part 2. 2nd ed. American Society of Agronomy, Soil Science Society of America, Madison, WI, Estados Unidos. p 643–698.
- Palm CA; Sánchez PA. 1991. Nitrogen release from the leaves of some tropical legumes as affected by their lignin and polyphenolic contents. *Soil Biology & Biochemistry* 23(1):83–88.
- Saffigna PG. 1988. ¹⁵N methodology in the field. En: Wilson JR, ed. *Advances in nitrogen cycling in agricultural ecosystems: Proceedings of the Symposium on advances in nitrogen cycling in agricultural ecosystems*, Brisbane, Australia, 11–15 mayo 1987. CAB International, Wallingford, Reino Unido. p 433–451.
- Swift MJ, ed. 1984. *Soil biological processes and tropical soil fertility: A proposal for a collaborative programme of research.* Biology International Special Issue 5. The International Union of Biological Sciences, París, Francia. 38 p.
- Thomas RJ; Asakawa NM. 1993. Decomposition of leaf litter from tropical forage grasses and legumes. *Soil Biology and Biochemistry* 25(10):1351–1361.
- Wong MTF; Hughes R; Rowell DL. 1990. The retention of nitrate in acid soils from the tropics. *Soil Use and Management* 6(2):72–74.

Mejoramiento de Oxisoles de Baja Fertilidad para Sistemas Agropastoriles de Alta Productividad en Sabanas Tropicales de Colombia

E. Amézquita¹, I. M. Rao², M. A. Rondón³, M. A. Ayarza⁴, P. Hoyos⁵, D. L. Molina⁶ e I. I. Corrales⁷

Resumen

Las sabanas neotropicales comprenden 243 millones de hectáreas en América del Sur y constituyen una de las fronteras agrícolas de más rápida expansión en el mundo. En el ecosistema sabanas de Colombia predominan Oxisoles de baja fertilidad natural que abarcan más de 17 millones de hectáreas. De esta área, 3.5 millones de hectáreas se conocen como 'atillanura', un agroecosistema donde la intensificación de la producción agrícola requiere cultivos tolerantes al Al, germoplasma forrajero adaptado y mejoramiento de las condiciones físicas, químicas y biológicas del suelo. Los sistemas de monocultivo con altos niveles de insumos y labranza excesiva (arado profundo) han demostrado una baja sostenibilidad, deterioro de las propiedades del suelo y un aumento de la incidencia de plagas y enfermedades. Los suelos de esta región se caracterizan por valores bajos de pH (4.0–4.8), alta saturación de Al (>90%) y bajos niveles de nutrientes (P, K, Ca y Mg). Además, estos suelos son susceptibles a degradación cuando se utilizan para la producción de cultivos o para la explotación pecuaria, siendo ésta una de las principales limitaciones edáficas para la producción rentable y sostenible de cultivos y ganado. Por otra parte, la labranza superficial del suelo con arado de discos ocasiona daños físicos como la compactación y formación de costras, alta densidad aparente (DA), bajas tasas de infiltración, alta escorrentía, baja disponibilidad de agua y alta susceptibilidad a la erosión. Para superar estas limitaciones físicas y de baja fertilidad en el suelo, el Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT) y la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (Corpoica) desde hace más de 20 años han venido evaluando en pruebas de campo el concepto: *Construcción de una Capa Arable*.

-
1. Física de suelos, Consultor Internacional. eamezquitac@gmail.com
 2. Fisiología y Nutrición de plantas, Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), Cali, Colombia. i.rao@cgiar.org
 3. Cambio Climático/Agua, International Development Research Centre (IDRC), Ottawa, Canadá. marcorondon@idrc.ca
 4. Cambio climático/Agronomía, Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (Corpoica), C.I. Tibaitatá, Mosquera, Colombia. mayarza@corpoica.org.co
 5. Zootecnia, Corpoica, C.I. La Libertad, Villavicencio, Colombia. fhoyosgarces@gmail.com
 6. Suelos/Agronomía, Centro de Investigación en Palma de Aceite (Cenipalma), Bogotá, Colombia. dmolina@cenipalma.org
 7. Agronomía, Consultora. iriscamv@hotmail.com

Esta capa consiste en una superficie de suelo mejorado con mínimas limitaciones físicas, químicas y biológicas con capacidad para garantizar cosechas y pasturas con producciones estables y sostenibles a través del tiempo. El objetivo principal de la capa arable es mejorar y mantener las condiciones físicas y químicas del suelo para favorecer el crecimiento de las raíces y, de esa forma, mejorar la actividad biológica. En este estudio se presentan los resultados de la construcción de una capa arable productiva en dos tipos de suelos contrastantes (franco arcilloso y franco arcillo arenoso) durante un período de 3 años. Se realizó labranza vertical del suelo, mediante el empleo de un arado de cincel rígido, con el objeto de: (1) romper verticalmente y aflojar el perfil del suelo para favorecer la tasa de infiltración, mejorar la capacidad de almacenamiento de agua y garantizar la distribución más homogénea de las enmiendas y los nutrientes aplicados, y (2) mejorar la estabilidad física del suelo mediante el uso de pasturas mejoradas de alta producción de raíces para evitar la compactación nuevamente y así mantener las condiciones favorables para el crecimiento y desarrollo de las plantas. Después de 3 años de mejoramiento, la tasa de infiltración incrementó cinco veces, la porosidad total aumentó entre 13 y 21% y se presentaron reducciones porcentuales (%) en la resistencia a la penetrabilidad (60–80), en dureza (50–65) y en compactación (10–15). Como resultado de este mejoramiento integrado del suelo, los rendimientos del maíz aumentaron de 3.7 t/ha en el primer año a 5.4 t/ha en el tercer año. Es posible mejorar la rentabilidad y la sostenibilidad de los sistemas cultivos-ganadería en las sabanas tropicales de Colombia utilizando esta tecnología integrada de manejo de suelos; además, existe un enorme potencial para extenderla a otras regiones con condiciones similares de suelos.

Palabras claves: sabanas tropicales, suelos ácidos, sistemas agropastoriles, agricultura sostenible

Introducción

Las sabanas neotropicales de América del Sur abarcan aproximadamente 250 millones de hectáreas en Bolivia, Brasil, Colombia, Guyana y Venezuela y están conectados con otras importantes bio-regiones en la Cuenca amazónica y la región del Chaco de Bolivia, Paraguay y Argentina. Debido a esta proximidad, y en parte por la similitud del recurso suelo, las tecnologías de manejo desarrolladas para sabanas han influido en las prácticas de aprovechamiento agronómico y de la tierra aplicadas en estos otros ecosistemas (Vera, 2004). Estas sabanas representan una de las últimas regiones con potencial para la producción agrícola y equivalen al área mundial cultivada bajo irrigación (Thomas, 2004).

En la comunidad internacional existe una enorme expectativa por el uso de esta región, una de las pocas disponibles en el mundo para la producción inmediata de alimentos. No obstante, en la actualidad uno de los grandes retos es preservar los recursos naturales mientras se asegura la sostenibilidad de la producción agrícola y pecuaria (Campanhola y Voss, 2004). En la medida en que la población mundial continúa creciendo y la demanda por alimentos se

incrementa, la productividad de algunos cultivos se ha estabilizado aumentando la necesidad de incorporar nuevas áreas de sabana a la producción agrícola (Thomas, 2004).

Las experiencias en el Cerrado de Brasil sugieren que los cultivos y las pasturas en monocultivo no son sostenibles con las prácticas comunes de manejo. La tasa anual estimada de degradación de tierras en esta región varía entre 2 y 4% (Thomas, 2004). Entre las causas de esta degradación se encuentran: la compactación y las pérdidas de suelo por erosión debido a prácticas no adecuadas de manejo, la pérdida de materia orgánica (MO), la infestación con malezas y el ataque de plagas y enfermedades.

Un ejemplo del grado de intervención antropogénica en el agroecosistema de sabana es el hecho de que más de 12 millones de hectáreas están dedicadas a cultivos anuales, muchos de los cuales, como maíz y soya, requieren altos niveles de insumos externos en forma de agroquímicos, energía y prácticas de manejo (Vera, 2004). Entre 30 y 50 millones de hectáreas en esta región se han transformado en pasturas en monocultivo y la mayoría de ellas se encuentra en avanzado estado de degradación (Lopes et al., 2004).

El reto para alcanzar sistemas sostenibles de cultivos y pasturas es generar tecnologías que mantengan altos niveles de productividad y minimicen los riesgos ambientales. Para lograr esto es necesario superar las limitaciones físicas, químicas y biológicas del suelo y hacer frente a la degradación que se presenta en sistemas de monocultivo, aun con altas aplicaciones de fertilizantes (Vera, 2004).

La labranza cero (siembra directa), la mínima labranza y los sistemas integrados de cultivos-ganado son tecnologías exitosas ampliamente adoptadas por los productores. Sin embargo, para asegurar en el largo plazo el desarrollo sostenible de estas áreas de sabanas es necesario entender los principios y el funcionamiento de estos sistemas; evaluar los aspectos sociales, culturales y económicos involucrados; promover políticas ambientales y comprender de forma clara la sostenibilidad y su medición. Lopes et al. (2004) sugieren que en las investigaciones futuras se deben buscar: (1) opciones de cultivos alternativos que toleren suelos ácidos, (2) un mejor entendimiento de los ciclos del agua y los nutrientes, (3) principios para el manejo de residuos orgánicos y de cosechas, y (4) el mejoramiento del manejo biológico de la fertilidad del suelo.

Según Amézquita et al. (2004), las principales limitaciones del suelo para la producción de cultivos y de pasturas en la altillanura plana (3.5 millones de hectáreas) de los Llanos Orientales de Colombia son: (1) alta acidez y baja disponibilidad de nutrientes, (2) valores altos de densidad aparente (DA), (3) alta susceptibilidad a erosión debido al laboreo, (4) débil estructura del suelo; (5) bajo contenido de materia orgánica, (6) sellamiento de la superficie, (7) baja actividad biológica y escasa biodiversidad, (8) bajo contenido de agua disponible, (9) baja capacidad de infiltración, y (10) baja conductibilidad hidráulica.

Para hacer productivos estos suelos de sabana es necesario mejorar sus condiciones y satisfacer los requerimientos para un buen desarrollo de raíces y una alta producción de cultivos. White (1997) y Amézquita (1998) consideran que estos requerimientos incluyen:

- Presencia suficiente y disponibilidad de los nutrientes esenciales.
- Aireación adecuada para el desarrollo de las raíces y los microorganismos.
- Adecuada disponibilidad de agua.
- Fácil penetración de las raíces.
- Germinación rápida y uniforme de semillas.
- Resistencia del suelo al sellado y a la erosión superficial.

Una comparación entre los factores limitantes en los suelos de sabanas en los Llanos Orientales de Colombia vs. los requerimientos necesarios para alcanzar una buena producción de cultivos, lleva a la conclusión de que estos suelos deben ser mejorados en sus condiciones físicas, químicas y biológicas, con el fin de hacerlos productivos y facilitar su paso hacia sistemas de agricultura de conservación (cero labranza). Este principio está apoyado en los resultados de dos experimentos de largo plazo que se discuten más adelante en este capítulo. Los resultados de trabajos de campo sobre mejoramiento de los suelos permitieron desarrollar el concepto: *Construcción de una Capa Arable*, que se basa en la combinación de: (1) germoplasma adaptado de cultivos y pasturas; (2) labranza vertical para superar las limitaciones físicas del suelo; (3) uso de enmiendas químicas (cal y fertilizantes) para mejorar la fertilidad del suelo; y (4) uso de sistemas agropastoriles para aumentar la población de raíces, promover la actividad biológica y evitar el sellamiento y la compactación del suelo después de la labranza (Amézquita, 1998).

Materiales y métodos

Localización y diseño experimental

Centro Nacional de Investigación (CNI), Carimagua

En este sitio, los trabajos de investigación del Ensayo Culticore se iniciaron en 1993 en suelos franco arcilloso limosos bien drenados (Typic Haplustox Isohipertérmicos caoliníticos) en condiciones de sabana nativa del CNI en Carimagua (4° 37' N, 71° 19' O y 175 m.s.n.m.), Llanos Orientales de Colombia. La precipitación promedio anual es 2240 mm y la temperatura promedio 27 °C. Los suelos se caracterizan por tener un pH aproximado de 4.5, valores muy bajos de Ca intercambiable, Mg, K y P, y una saturación de Al muy alta ($\approx 90\%$) (Jiménez et al., 2001).

Los tratamientos en campo se distribuyeron en un diseño de bloques al azar con cuatro repeticiones, tanto para los sistemas basados en arroz seco como para los sistemas basados en maíz, los monocultivos y los sistemas en rotación en parcelas de 0.36 ha y para las pasturas de 0.72 ha. En la Fase I se aplicaron dosis diferentes de cal, para arroz seco (0.5 t/ha) y una

dosis mayor de cal (2 t/ha) para los sistemas basados en maíz, de acuerdo con los requerimientos del cultivo. Los sistemas de producción basados en arroz seco se establecieron de la siguiente manera: (1) monocultivo, (2) arroz en rotación con caupí para producción de grano, (3) arroz en rotación con caupí para incorporación como abono verde, y (4) arroz en rotación con pasturas mejoradas de gramíneas en mezcla con leguminosas (*Brachiaria humidicola* CIAT 679 + *Arachis pintoii* CIAT 17434 + *Stylosanthes capitata* CIAT 10280 + *Centrosema acutifolium* CIAT 5277). Las rotaciones con caupí o abono verde tuvieron un ciclo de un año, así: en el primer semestre se sembró arroz y en el segundo se sembró la leguminosa. Las pasturas se sembraron en 1993 y 1998, una vez establecido el cultivo del arroz, y se utilizaron en pastoreo durante 4 años. Estos mismos tratamientos de rotación se utilizaron con maíz, pero en este caso se utilizó soya como leguminosa. Se incluyeron, además, la pastura mejorada de *Panicum maximum* CIAT 6871 cv. Centenario + *Arachis pintoii* CIAT 17434 + *Pueraria phaseoloides* CIAT 9900, y una parcela de sabana nativa como testigo.

Las parcelas de arroz recibieron una aplicación anual equivalente (kg/ha) de cal dolomítica (200), N (80) fraccionados en tres aplicaciones (20 + 30 + 30), P (60) y K (100). En las leguminosas (caupí o abono verde) se aplicaron dosis equivalentes (kg/ha) de N (20), P (40) y K (60). Las pasturas fueron fertilizadas cada 2 años con 20 kg ha de P y se pastorearon en parcelas de 200 × 18 m (3600 m²). Las parcelas de maíz recibieron cada año aplicaciones equivalentes (kg/ha) de cal dolomítica (200), N (120) dividido en tres aplicaciones iguales, P (80) y K (100) igualmente divididos en tres aplicaciones. Para más información sobre el manejo del ensayo se recomienda consultar los artículos de Friesen et al. (1997) y Amézquita et al. (2002b).

Finca Matazul

En un Typic Haplustox Isohipertérmico caolinítico (Soil Survey Staff, 1994) de la finca Matazul, localizada a 4° 9' 4.9" N, 72° 38' 23" O y 260 m.s.n.m., se realizó un ensayo satélite al ensayo Culticore. En la zona, el promedio de precipitación anual fue de 2719 mm, la temperatura de 26.2 °C, la evapotranspiración de 1623 mm y la humedad relativa de 81%.

En dos suelos con texturas contrastantes (liviana y pesada) (Cuadro 1) en un diseño experimental de bloques completamente al azar se aplicaron tres dosis de cal dolomítica (1, 2 y 3 t/ha) que se incorporaron con arado cincel a profundidades 0–15, 0–30 y 0–45 cm, respectivamente, y con un arado de discos (control) a una profundidad de 0–10 cm. El objetivo del ensayo fue mejorar las condiciones físicas del suelo para facilitar la penetración de las raíces a diferentes profundidades y mejorar las condiciones químicas mediante la aplicación de cal y fertilizantes. Las cantidades de Ca, Mg y K aplicadas se calcularon para incrementar los niveles de saturación de bases en el complejo cambiante a 50%, 20% y 5%, respectivamente; y la cantidad de P para aumentar su disponibilidad a 20 ppm. Se establecieron el cultivo de maíz y el pasto guinea (*Panicum maximum*); el primero se sembró cada año durante 3 años consecutivos, y el segundo solo en el primer año. Para estudiar el efecto residual de estos tratamientos después de 3 años, se estableció maíz utilizando siembra directa.

Cuadro 1. Algunas características físicas y químicas de dos suelos de texturas contrastantes. Matazul, Llanos Orientales de Colombia.

Parámetro	Textura liviana (franco arenosa)	Textura pesada (franco arcillosa)
Propiedades químicas		
pH (H ₂ O)	4.92	4.76
Ca (cmol/kg)	0.13	0.07
Mg (cmol/kg)	0.06	0.06
Al (cmol/kg)	1.10	2.64
P (mg/kg)	2.80	2.60
Saturación de Ca (%)	10.30	2.40
Saturación de Mg (%)	4.80	2.20
Saturación de Al (%)	79.60	93.10
Al (cmol/kg)	1.10	2.64
Fe (mg/kg)	19.10	12.60
Mn (mg/kg)	1.20	1.10
Cu (mg/kg)	0.20	0.50
Zn (mg/kg)	0.40	0.40
B (mg/kg)	0.16	0.20
Propiedades físicas		
Arena (%)	60.00	30.00
Materia orgánica (%)	2.20	4.60
Infiltración (cm/h)	1.87	1.37
Porosidad total (%)	42.70	50.30
Penetrabilidad (kg/cm ²)	14.50	16.20
Dureza del suelo (kPa)	60.20	63.70
Densidad aparente (Mg/m ³)	1.49	1.27
Densidad de partícula (Mg/m ³)	2.60	2.62

Resultados y discusión

CNI, Carimagua

Densidad aparente en suelos del Cerrado y sabanas de los Llanos Orientales de Colombia

En general existe la creencia de que los suelos de sabanas en el mundo, especialmente en América del Sur, son similares debido a que presentan en la mayoría de los casos paisaje y vegetación similares. No obstante, los suelos de sabana de diferentes lugares (p. ej., América del Sur y África) presentan condiciones naturales diferentes para el crecimiento de raíces y la

respuestas de los cultivos es también diferente. En la Figura 1 aparecen los valores de densidad aparente (DA) de los suelos de los Cerrados brasileños y de algunas series de suelo del CNI, Carimagua, en los Llanos Orientales de Colombia.

En la Figura 1 se observa claramente que los valores de DA a través del perfil (0–200 cm) son menores en los suelos del Cerrado que en los del CNI, Carimagua. En los Cerrados, la DA presenta valores $< 1.00 \text{ Mg/m}^3$, excepto cuando el suelo se cultivó con labranza convencional; por el contrario, en el CNI, Carimagua, los valores varían entre 1.25 y 1.70 Mg/m^3 entre 0 y 100 cm de profundidad de suelo. Estos resultados significan que los suelos en los Cerrados tienen, entre otras características, una mayor tasa de infiltración, mejor capacidad de almacenamiento y distribución de agua, y mayor capacidad y volumen para crecimiento de las raíces, en comparación con los suelos de los Llanos Orientales. Estos últimos son más pesados, tienen baja capacidad de infiltración, son menos porosos y tienen menos volumen para el desarrollo de raíces. La razón principal para estas diferencias es el origen geológico de ambos suelos; en los Cerrados se han desarrollado *in situ*, mientras que en los Llanos Orientales han sido formados principalmente por deposición de sedimentos ocasionados por la erosión de las partes altas.

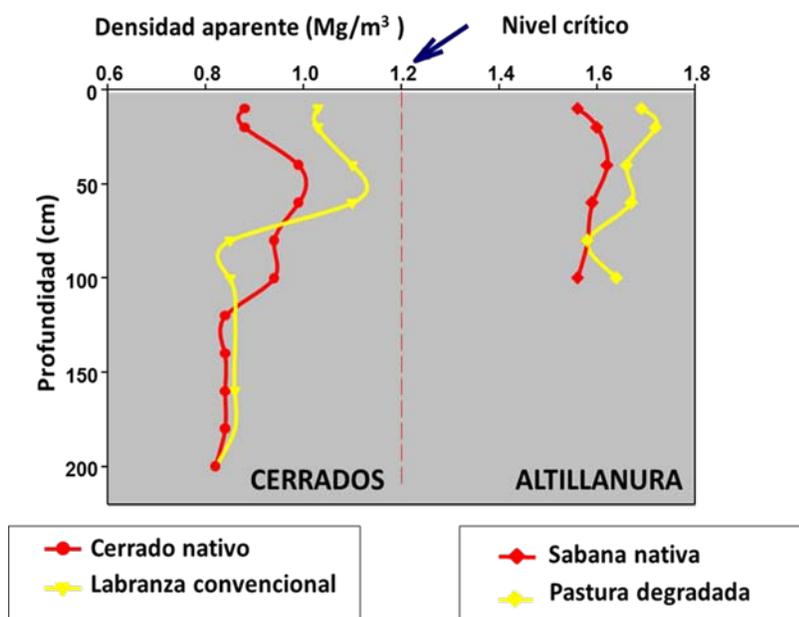


Figura 1. Diferencia en densidad aparente (Mg/m^3) entre suelos de los Cerrados (Brasil) y la altillanura de los Llanos Orientales de Colombia.

Efecto de los tratamientos Cultivore sobre las condiciones físicas del suelo

Los cambios en las propiedades físicas del suelo, como resultado de la rotación de cultivos y los sistemas de manejo, aparecen en el Cuadro 2. La conductibilidad hidráulica saturada de estos Oxisoles es baja. Una conductibilidad hidráulica de 10 cm/h se considera

Cuadro 2. Impacto de diferentes sistemas de producción agrícola en algunas características físicas del suelo después de 5 años del establecimiento del ensayo.

Profundidad (cm)	Sistemas de producción	Conductividad hidráulica (cm/h)	Densidad aparente (Mg/m ³)	Macroporosidad (%)
0–10	Arroz monocultivo	5.3	1.17	19.6
	Arroz-caupí (grano)	7.4	1.29	14.6
	Arroz-caupí (abono verde)	6.1	1.19	14.4
	Sabana nativa	5.1	1.24	14.6
	Arroz-pastura	3.9	1.31	12.3
	DMS _{0.05} ^a	NS ^b	0.09	5.10
10–20	Arroz monocultivo	5.9	1.23	15.9
	Arroz-caupí (grano)	14.4	1.23	17.1
	Arroz-caupí (abono verde)	13.5	1.25	17.2
	Sabana nativa	0.9	1.31	11.3
	Arroz-pastura	0.5	1.37	7.80
	DMS _{0.05}	11.4	0.09	5.30
20–40	Arroz monocultivo	0.8	1.47	6.50
	Arroz-caupí (grano)	1.9	1.34	11.3
	Arroz-caupí (abono verde)	3.7	1.31	12.4
	Sabana nativa	0.4	1.42	7.20
	Arroz-pastura	3.0	1.35	11.0
	DMS _{0.05}	NS	0.12	5.2

a. DMS_{0.05} = Prueba de Duncan.

b. NS = diferencias no significativas.

crítica en las condiciones de clima prevalentes en el CNI, Carimagua, caracterizado por una precipitación anual de 2700 mm con eventos ocasionales de alta intensidad (> 100 mm/h). La mayoría de los valores observados estuvieron por debajo de este valor, resultados que indican que este suelo tiene una capacidad limitada de movimiento descendente de agua, lo que favorece el encharcamiento temporal durante las precipitaciones intensas en períodos cortos de tiempo; más aún, si se tiene en cuenta que este movimiento se hace más crítico, a medida que aumenta la profundidad en el suelo. En consecuencia, las estrategias de manejo de suelos para cultivos y pasturas mejoradas en este sitio deben incluir prácticas que favorezcan el mejoramiento de la conductividad hidráulica.

Aunque las diferencias en DA a profundidades entre 0–10 y 10–20 cm fueron significativas ($P < 0.05$) entre sistemas, se considera que los valores observados no son limitantes para el crecimiento y distribución de las raíces. Por debajo de 20 cm de profundidad,

donde se espera que el arado de disco no tenga un impacto directo, los valores de DA fueron por lo general más altos que aquellos encontrados en las capas aradas; no obstante, las diferencias no fueron significativas cuando se compararon con los valores encontradas en la sabana nativa a las mismas profundidades, lo que indica que la labranza del suelo no fue causante de la compactación adicional en las capas inferiores del subsuelo.

A pesar de que se encontraron algunas diferencias ($P < 0.05$) en macroporosidad del suelo entre algunos sistemas, los valores entre 0–10 y 10–20 cm de profundidad no se consideran limitantes para el crecimiento y la distribución de las raíces. Después de 20 cm se encontraron algunos valores más bajos que el valor crítico (10%); por ejemplo, en arroz en monocultivo se presentaron valores muy bajos entre 20 y 40 cm de profundidad cuando se compararon con sistemas en rotación.

Efecto de los tratamientos Culticore sobre las condiciones de fertilidad del suelo

Los cambios temporales en pH y contenidos de Al intercambiable en el suelo fueron similares en todos los tratamientos que incluyeron arroz seco. Estas fluctuaciones temporales en todas las capas de suelo pueden ser atribuidas a la variabilidad asociada con factores como quemas y condiciones anaerobias temporales debidas a las altas precipitaciones que impactan en forma directa el pH del suelo y, en consecuencia, la concentración de Al soluble (Amézquita et al., 2002b).

El aumento de los contenidos de P y Ca en el suelo es un reflejo de la intensidad del sistema de uso. Cuando no se aplicó P o Ca como insumo no se encontraron cambios en la disponibilidad de estos nutrientes en el suelo, durante los 5 años de experimentación. La disponibilidad de P permaneció baja en todas las profundidades hasta 40 cm en el suelo y el Ca intercambiable fue más alto en la superficie (0–10 cm) que en las capas inferiores. En los sistemas arroz seco-agropastoril (arroz/*B. humidicola* + leguminosa), los niveles de P aprovechable y Ca intercambiable incrementaron ligeramente a través del tiempo, como respuesta a las aplicaciones iniciales de cal y P en el cultivo pionero de arroz seco y a las pequeñas dosis bianuales aplicadas a las pasturas. Los niveles de P aprovechable (≈ 10 mg/kg) encontrados se consideran adecuados para el desarrollo de germoplasma de pasturas mejoradas en estos suelo ácidos.

En el sistema arroz en monocultivo, la disponibilidad de P aumentó durante los primeros 3 años como respuesta a la fertilización, pero permaneció constante durante los 2 últimos años, principalmente en la capa superficial del suelo (0–10 cm). Esto pudo deberse a la remoción del P por las malezas que fueron cada vez más prevalentes a medida que el ensayo avanzó, y a la fijación de P por el suelo incorporado desde las capas inferiores del subsuelo, debido a las excesivas labores de arado (Friesen et al., 1997). El aumento observado en 1998 del P disponible en la capa de suelo entre 10 y 20 cm apoya la interpretación anterior. El Ca intercambiable aumentó en todas las capas de suelo como una respuesta a las aplicaciones anuales de cal. En la superficie del suelo, el mayor aumento ocurrió en el primer año y permaneció constante en los años siguientes. Por el contrario, la aplicación anual de Ca se

reflejó en las capas localizadas entre 10–20 y 20–40 cm, donde aumentó en forma progresiva durante el período de 5 años debido, probablemente, al proceso de lixiviación desde las capas superiores del suelo.

Los cambios en pH y Al intercambiable del suelo no mostraron una buena correlación con los cambios en el contenido de Ca intercambiable, debido posiblemente a las bajas dosis de cal aplicadas y al lavado de este elemento hacia las capas inferiores, como acompañante de nitrato (NO_3^-) o de aniones de cloro (Cl^-) que no afectaron el pH. Los cambios en el contenido de Ca intercambiable en la rotación de arroz-caupí fueron muy similares a aquellos que ocurrieron en monocultivo de arroz, aunque el movimiento del Ca en el subsuelo fue ligeramente menor, quizás debido a la remoción por las raíces profundas de caupí y al reciclado del Ca hacia la superficie a través de los residuos de esta leguminosa. En contraste, los niveles de P aprovechable en la capa 0–10 cm aumentaron mucho más rápido en el tiempo y estuvieron acompañados por niveles crecientes de P entre 10 y 20 cm. Estos aumentos de P disponible reflejan las aplicaciones adicionales de fertilizantes fosfatados al componente caupí de la rotación, mientras los aumentos en el subsuelo fueron probablemente el resultado de las labores adicionales necesarias para el cultivo de caupí.

El sistema arroz-caupí, incorporado como abono verde, fue el más intensamente cultivado. Aunque los insumos de la cal y el fertilizante P fueron iguales a los aplicados en el sistema de arroz-caupí, para la producción de grano, existieron diferencias notables entre ambos en P disponible y Ca intercambiable. El Ca intercambiable en la capa 0–10 cm no alcanzó los niveles observados en el monocultivo de arroz o en el sistema arroz-caupí, aunque los cambios en las capas del subsuelo fueron muy similares a estos últimos. Esto puede ser explicado por una mayor tasa de lixiviación de Ca soluble a través del perfil del suelo con las mayores concentraciones de nitratos originadas por la mineralización y los procesos de nitrificación resultantes de la descomposición de los residuos del abono verde (Friesen et al., 1997). El P disponible siguió una tendencia temporal similar a la observada en el sistema arroz-caupí en los 3 primeros años. No obstante, en los últimos 2 años, el aumento en la intensidad de labranza ocasionó, aparentemente, algún grado de incorporación de P.

Relación entre productividad de maíz y crecimiento de raíces

La Figura 2 muestra las producciones promedio de maíz establecido después de 5 años de los tratamientos sabana nativa, en monocultivo y pasturas mejoradas. Los rendimientos variaron entre 1.2 Mg/ha después de sabana nativa hasta 4.2 Mg/ha después de 5 años de la pastura (*P. maximum* + leguminosa), resultado que muestra el efecto benéfico de las raíces de las pasturas en el mantenimiento de las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo para la producción de maíz. El maíz monocultivo después de 5 años de cultivo continuo produjo 2.1 Mg/ha, lo que demuestra las ventajas de la rotación maíz-pasturas en el mantenimiento de las condiciones del suelo y en el incremento de la producción del maíz (Foto 1).

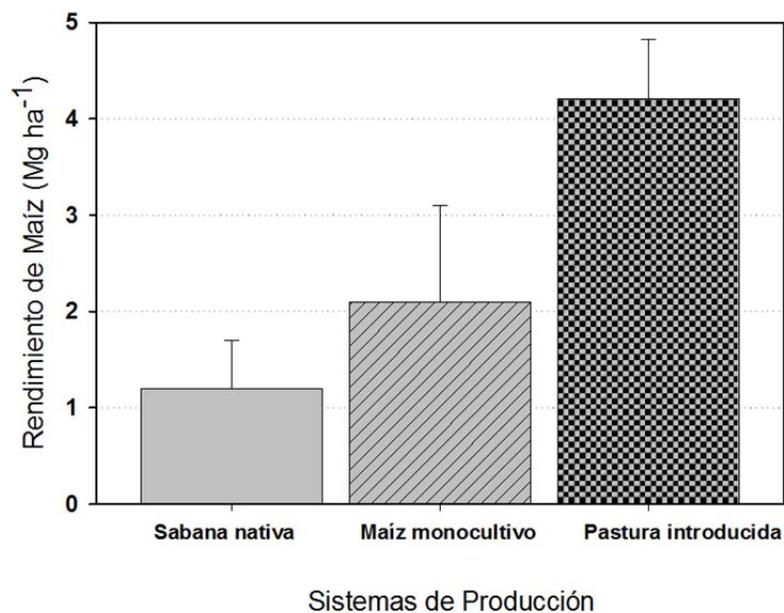


Figura 2. Producción de grano de maíz (Mg/ha) en los sistemas de producción sabana nativa, monocultivo y pastura introducida. Ensayo Culticore, CNI, Carimagua, Llanos Orientales de Colombia.

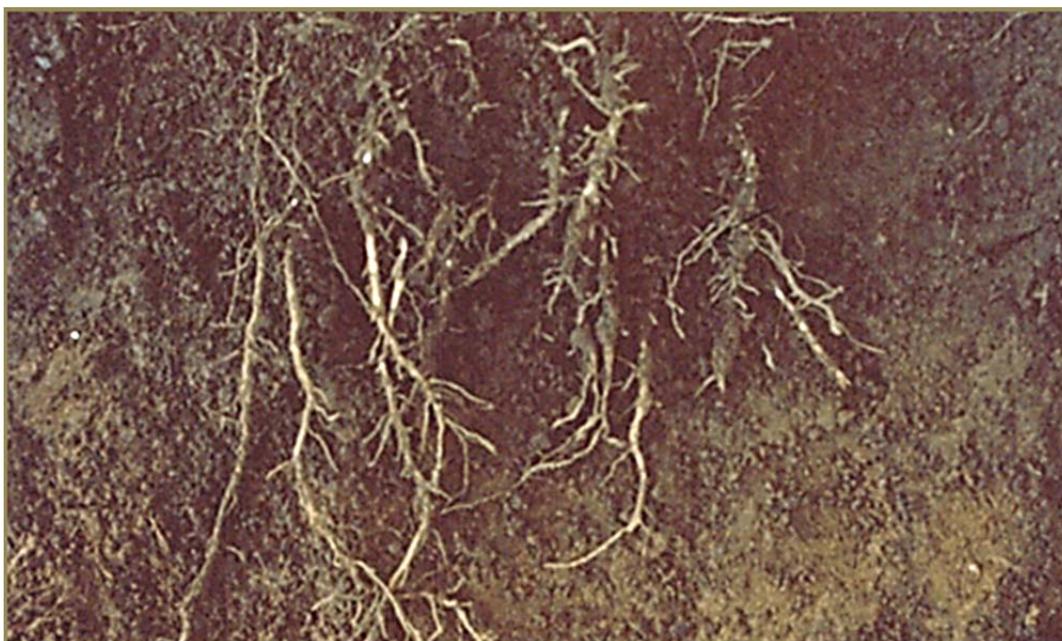


Foto 1. Penetración de raíces de maíz en las capas del subsuelo con labranza mínima, después de 5 años de la rotación maíz-*Panicum maximum* + leguminosas. CNI, Carimagua, Llanos Orientales de Colombia.

La relación entre la profundidad de enraizamiento del maíz y el rendimiento de grano aparece en la Figura 3. A medida que la presencia de raíces es mayor en la profundidad del suelo, mayor es la producción de granos. Los rendimientos más bajos (1 Mg/ha) se encontraron cuando la profundidad de las raíces se concentró en la capa superficial (0–10 cm), lo cual ocurrió en las parcelas procedentes de sabana nativa; por el contrario, los mayores rendimientos de grano se obtuvieron cuando las raíces penetraron hasta 40 cm de profundidad en el suelo, correspondiente a parcelas cultivadas durante 5 años con pasturas mejoradas de *P. maximum* + leguminosas forrajeras. Estos resultados indican que una profundidad efectiva de preparación de suelos con arado cincel debe ser aproximadamente de 28 cm. A medida que la profundidad de arado aumenta, las raíces tienen un mayor volumen de suelo para explorar y, en consecuencia, la absorción de agua y nutrientes para crecimiento del cultivo también es mayor.

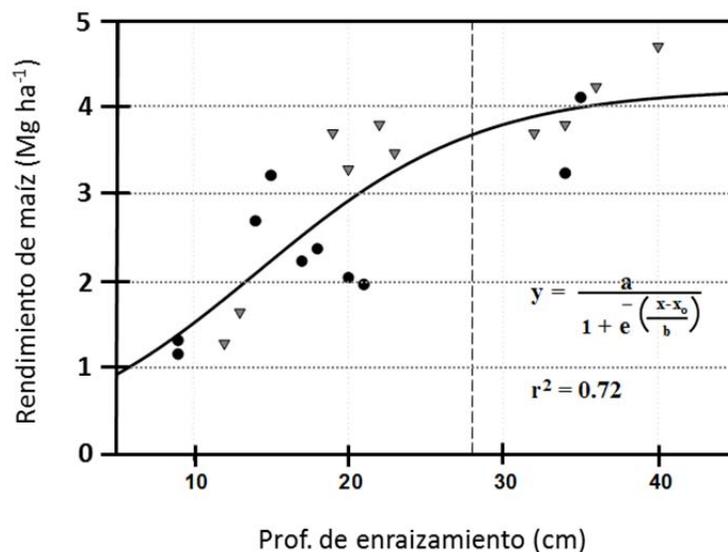


Figura 3. Relación entre rendimiento de grano de maíz y profundidad de labranza. Ensayo Culticore, CNI, Carimagua, Llanos Orientales de Colombia.

Finca Matazul

Efectos de los tratamientos en las condiciones físicas del suelo

Con el fin de evaluar el concepto de *Construcción de una Capa Arable* (Figura 4) (Amézquita et al., 2002a), en dos suelos de texturas contrastantes (franco arenosos y franco arcilloso) se establecieron ensayos en campo que fueron monitoreados vía satélite. Algunas condiciones físicas y químicas de estos suelos aparecen en el Cuadro 1.

El objetivo principal del estudio fue mejorar la capacidad de producción de estos suelos hasta una profundidad de 45 cm. En un primer paso, la labranza del suelo se hizo con arado cincel a profundidades entre 0–15 y 0–30 cm; después de esta labor se realizó una segunda



Figura 4. Marco conceptual del desarrollo de una capa arable.

labranza entre 30 hasta 45 cm de profundidad. La cal se calculó y aplicó para alcanzar una saturación final de Ca de 50% a la profundidad de labranza, y se incorporó con arado-cinzel (labranza vertical), el Mg y el K se aplicaron hasta alcanzar valores de saturación de 20 y 5%, respectivamente, utilizando fuentes apropiadas del fertilizante (cal dolomítica + sulcamag y KCl).

Después de 3 años de establecido el ensayo se produjeron algunos cambios en la condición física del suelo (Cuadro 3). Se observa que la porosidad total y la infiltración aumentaron respecto a la sabana nativa. La tasa de infiltración de agua, en cm/h, aumentó de 1.87 (sabana nativa) a 8.10 (cinzel a 30 cm) y a 3.40 (cinzel a 40 cm), en suelos franco arenosos; y de 1.37 (sabana nativa) a 2.90 (cinzel a 30 cm) y a 9.20 (cinzel a 40 cm), en suelo franco arcilloso; no obstante, no fue posible alcanzar el valor esperado de 15 cm/h, lo que significa que es necesario incorporar más raíces en el perfil del suelo para aumentar la capacidad de infiltración y reducir la DA en estos suelos. Por otro lado, es claro que el suelo franco arcilloso responde mejor a los tratamientos y muestra mejores condiciones, si se compara con las condiciones iniciales de suelo.

La porosidad total también aumentó con los tratamientos y pasó de 42.7% (sabana nativa) a 51.7% (cinzel a 30 cm) y 48.2% (cinzel 45 cm) en el suelo franco arenoso; y de 50.3% (sabana nativa) a 57.2% en ambos tratamientos en el suelo franco arcilloso. En consecuencia, el mejoramiento de la porosidad del suelo por los tratamientos redujo la resistencia a la penetración, la dureza del suelo y la DA, cuando se compara con las condiciones naturales de la sabana nativa, lo que muestra el mejoramiento en estas condiciones y, en general, en el ambiente para el crecimiento de raíces, alcanzando así los valores propuestos en las condiciones físicas del suelo.

Cuadro 3. Mejoramiento de las propiedades del suelo (0–15 cm de profundidad) después de 3 años de aplicados los tratamientos en la finca Matazul, Llanos Orientales de Colombia.

Parámetro	Sabana nativa	Labranza de suelo		Valor objetivo
		Cinzel (0–30 cm)	Cinzel (0–45 cm)	
Suelo franco arenoso				
Infiltración (cm/h)	1.87	8.10	3.40	15
Porosidad total (%)	42.70	51.70	48.20	50
Resistencia a la penetración (kg/cm ²)	14.50	3.16	3.00	< 10
Dureza (Kpa)	60.20	19.30	21.50	< 40
Densidad aparente (Mg/m ³)	1.49	1.26	1.35	1.3
Suelo franco arcilloso				
Infiltración (cm/h)	1.37	3.90	9.20	10
Porosidad total (%)	50.30	57.20	57.20	50
Resistencia a la penetración (kg/cm ²)	16.20	5.96	4.62	< 15
Dureza (Kpa)	63.70	29.20	22.20	< 45
Densidad aparente (Mg/m ³)	1.27	1.10	1.10	1.0

Efectos de los tratamientos en las condiciones químicas del suelo

El efecto de los tratamientos en el mejoramiento de las condiciones químicas del suelo de textura franco arenosa se presenta en el Cuadro 4. Las cantidades de Ca y Mg aumentaron a medida que incrementó la profundidad en comparación con sabana nativa. Ambos nutrientes alcanzaron las capas de suelo más profundas cuando se utilizó arado de cinzel a 45 cm. Los resultados de la saturación de bases mostraron diferencias significativas entre tratamientos (Cuadro 4). Entre 0 y 5 cm de profundidad, la saturación de Ca aumentó desde 12.06%, en condiciones de sabana nativa, hasta valores entre 58 y 71% en los tratamientos, independientemente del sistema. A profundidades entre 5 y 15 cm aumentó desde 9.35% a un rango entre 40 y 70%, como resultados de los tratamientos aplicados. Cuando la profundidad del cinzel fue de 30 cm, los aumentos de Ca en el suelo entre 15 y 25 cm de profundidad fueron muy pequeños; no obstante, cuando el cinzel alcanzó 45 cm de profundidad, los aumentos fueron mayores. El objetivo del ensayo fue aumentar la saturación de Ca a un valor de 50% a la profundidad de influencia del cinzel, y como puede observarse, este objetivo sobrepasó únicamente la primera profundidad en el suelo (franco arcilloso) y para las dos primeras profundidades (cinzel a 45 cm), en los suelos de textura franco arenosa. La mejor saturación de Ca se alcanzó con el cinzel hasta 45 cm, debido a que con este implemento la incorporación de cal no se hace de forma horizontal y uniforme; se espera que con incorporaciones sucesivas se alcance una mayor uniformidad.

Cuadro 4. Efecto del manejo de suelos y sistemas de cultivo en el mejoramiento de las condiciones químicas del suelo franco arenoso después de 3 años del establecimiento de los tratamientos en la finca Matazol, Llanos Orientales de Colombia.

Profundidad (cm)	Sabana nativa	Cíncel (0–30 cm)			Cíncel (0–45 cm)		
		Sistema de cultivo ^a			Sistema de cultivo ^a		
		1	2	3	1	2	3
Ca (cmol/kg)							
0 a 5	0.170	0.91 b*	1.14 a	1.21 a	1.64 a	1.64 a	1.69 a
5 a 15	0.113	0.57 a	0.59 a	0.67 a	1.04 a	1.06 a	1.03 a
15 a 25	0.077	0.10 b	0.16 a	0.17 a	0.23 a	0.28 a	0.21 a
25 a 35	0.070	0.08 a	0.09 a	0.10 a	0.11 a	0.14 a	0.13 a
Mg (cmol/kg)							
0 a 5	0.100	0.37 a	0.40 a	0.41 a	0.49 a	0.44 a	0.48 a
5 a 15	0.047	0.40 a	0.33 a	0.34 a	0.46 a	0.50 a	0.45 a
15 a 25	0.033	0.05 b	0.07 b	0.09 a	0.11 a	0.14 a	0.11 a
25 a 35	0.027	0.03 b	0.04 ab	0.05 a	0.05 a	0.07 a	0.06 a
Saturación Ca (%)							
0 a 5	12.06	58.0 b	61.6 ab	64.4 a	69.1 a	70.3 a	71.6 a
5 a 15	9.35	40.6 a	37.8 a	45.3 a	57.2 a	60.6 a	59.3 a
15 a 25	7.19	9.8 b	12.6 ab	14.3 a	19.2 ab	23.3 a	16.7 b
25 a 35	8.42	8.2 a	8.1 a	9.8 a	10.7 a	13.4 a	10.7 a
P (mg/kg)							
0 a 5	3.67	8.4 a	8.5 a	8.7 a	10.2 a	10.4 a	10.3 a
5 a 15	2.37	19.9 a	20.0 a	20.1 a	28.5 a	28.7 a	28.6 a
15 a 25	1.43	6.6 a	6.9 a	9.0 a	11.3 a	12.5 a	4.6 b
25 a 35	1.35	1.9 a	2.2 a	1.7 a	1.6 a	2.4 a	2.0 a

* Valores con letras iguales en la misma característica y sistema no difieren en forma significativa ($P < 5\%$), según la prueba de Duncan.

a. Sistema de cultivo:

- (1) Año 1 (arroz/arroz), año 2 (maíz/millo Perla + leguminosa), año 3 (maíz).
- (2) Año 1 (arroz/pastura), año 2 (maíz/soya), año 3 (maíz).
- (3) Año 1 (arroz + pastura + leguminosa), año 2 (maíz/millo Perla), año 3 (maíz).

La cantidad de P disponible aumentó de 3.67 a 10.4 mg/kg entre 0 y 5 cm de profundidad en el suelo y entre 2.37 y 28.7 mg/kg en la segunda profundidad. Los menores aumentos en la disponibilidad P se encontraron en las capas más profundas, aunque la disponibilidad de este nutriente fue mayor que el valor inicial presentado en la sabana nativa. La

mayor disponibilidad de P en la segunda capa se debe a la incorporación con cinceles. La disponibilidad de P aparentemente es suficiente para el crecimiento de cultivos en ambos tipos de suelo, aunque es posible que parte del P aplicado haya sido fijado (Le Mare y León, 1989).

Los efectos de los tratamientos sobre las características del suelo de textura franco arcillosa aparecen en el Cuadro 5. Los contenidos de Ca y Mg aumentaron con la profundidad en ambos tratamientos de cincel, en comparación con la sabana nativa. La saturación de Ca alcanzó valores por encima de 50% en la primera capa, pero disminuyó con la profundidad, lo que muestra que en esta clase de suelos es más difícil conseguir una incorporación uniforme de la cal. Aun así, el suministro de Ca y Mg no fue limitante para la producción de maíz. La disponibilidad de P aumentó ligeramente en los tratamientos, en comparación con la sabana nativa. De la misma forma que en el suelo franco arenoso, los mayores valores se encontraron en la segunda capa, debido a los efectos del cincel.

Rendimientos de maíz

No obstante que no se encontraron diferencias significativas entre los tratamientos, los rendimientos generales fueron mayores que los obtenidos con los sistemas de labranza tradicional usada por los agricultores (1.0 Mg/ha) en el suelo franco arenoso y 1.5 Mg/ha) en suelo franco arcilloso (Cuadros 6 y 7). En ambos suelos, los rendimientos de maíz aumentaron en los tres sistemas de manejo (Sistema de cultivo, Dosis de encalado y Profundidad de cincel) en función del tiempo. Los mayores rendimientos se obtuvieron en el suelo franco arcilloso (Cuadro 7). En los suelos franco arenosos, los rendimientos de maíz aumentaron, en promedio, de 3.89 Mg/ha en el 2002 a 5.37 Mg/ha en el 2003, lo que muestra un aumento de los rendimientos debido al mejoramiento del suelo en el tiempo y al uso de híbridos mejorados de maíz.

En el suelo franco arcilloso, los rendimientos promedio de maíz en el 2002 fueron de 4.30 Mg/ha y en el 2003 de 6.19 Mg/ha (Cuadro 7). De manera similar a los resultados obtenidos en el suelo franco arenoso (Cuadro 6), los rendimientos aumentaron con el transcurso del tiempo, debido a los mismos factores, además de la influencia de los mayores contenidos de arcilla en la fertilidad del suelo y la retención de agua. Estos resultados indican que el mejoramiento de las condiciones físicas y químicas de estos suelos conduce a un mejor crecimiento de las raíces, que es esencial para la alta productividad y sostenibilidad del sistema. Por tanto, la construcción de una capa arable es un concepto fundamental y un instrumento de gestión para estimular el crecimiento de raíces y mejorar la calidad del suelo. Este concepto puede ser aplicado a otros suelos con restricciones físicas y químicas similares a las de los suelos de los Llanos Orientales de Colombia.

Con la utilización de esta tecnología integrada de manejo de suelos es posible mejorar la rentabilidad y la sostenibilidad de los sistemas agropastoriles en las sabanas tropicales de Colombia. Existe un alto potencial para extender esta tecnología de manejo de suelos a otros suelos de baja fertilidad de las sabanas tropicales.

Cuadro 5. Efecto del manejo de suelos y sistemas de cultivo en el mejoramiento de las condiciones químicas del suelo franco arcilloso después de 3 años del establecimiento de los tratamientos en la finca Matazul, Llanos Orientales de Colombia.

Profundidad (cm)	Sabana nativa	Cíncel (0–30 cm)			Cíncel (0–45 cm)		
		Sistema de cultivo ^a			Sistema de cultivo ^a		
		1	2	3	1	2	3
Ca (cmol/kg)							
0 a 5	0.090	2.85 a*	2.02 b	2.18 b	2.90 b	2.90 b	3.31 a
5 a 15	0.057	0.86 b	0.79 b	1.06 a	1.00 a	1.26 a	1.27 a
15 a 25	0.050	0.17 a	0.17 a	0.18 a	0.22 a	0.23 a	0.26 a
25 a 35	0.043	0.10 b	0.17 a	0.09 b	0.12 a	0.15 a	0.22 a
Mg (cmol/kg)							
0 a 5	0.077	1.02 a	0.84 ab	0.82 b	1.09 b	1.09 b	1.23 a
5 a 15	0.053	0.46 b	0.39 c	0.60 a	0.47 b	0.58 ab	0.66 a
15 a 25	0.043	0.09 b	0.08 b	0.11 a	0.12 a	0.14 a	0.12 a
25 a 35	0.043	0.05 b	0.06 a	0.04 b	0.06 a	0.06 a	0.12 a
Saturación Ca (%)							
0 a 5	3.03	60.9 a	53.0 a	55.2 a	64.0 b	66.5 a	66.8 a
5 a 15	2.08	25.0 b	24.8 b	31.5 a	33.7 b	47.0 a	39.3 ab
15 a 25	2.21	6.8 a	7.3 a	7.3 a	9.2 a	12.5 a	12.3 a
25 a 35	2.47	5.2 b	8.9 a	5.1 b	6.5 a	10.3 a	10.2 a
P (mg/kg)							
0 a 5	4.49	3.9 a	4.2 a	4.1 a	7.3 a	7.4 a	7.5 a
5 a 15	1.69	16.7 a	16.6 a	16.8 a	10.9 a	11.0 a	11.2 a
15 a 25	1.69	2.4 b	2.6 ab	6.9 a	3.8 a	4.3 a	3.8 a
25 a 35	1.35	1.5 a	1.1 b	1.4 ab	1.2 b	1.6 ab	2.4 a

* Valores con letras iguales en la misma característica y sistema no difieren en forma significativa ($P < 5\%$), según la prueba de Duncan.

a. Sistema de cultivo:

- (1) Año 1 (arroz/arroz), año 2 (maíz/millo Perla + leguminosa), año 3 (maíz).
- (2) Año 1 (arroz/pastura, año 2 (maíz/soya), año 3 (maíz).
- (3) Año 1 (arroz + pastura + leguminosa), año 2 (maíz/millo Perla), año 3 (maíz).

Cuadro 6. Rendimiento de grano de maíz, suelo franco arenoso. Matazul, Llanos Orientales de Colombia.

Tratamientos	Rendimiento de grano de maíz (Mg/ha)		
	Año 2002	Año 2003	
	Maize H-108	Maize H-108	Híbrido comercial
Sistema de cultivo ^a			
1	3.285 b*	4.495 a	5.237 a
2	4.047 a	4.484 a	5.382 a
3	4.034 a	4.700 a	5.454 a
Fuente de cal			
Dolomítica	3.589 b	4.573 a	5.405 a
Sulcamag + cal	3.988 a	4.546 a	5.371 a
Profundidad de cincel (cm)			
0-30	3.554 b	4.534 a	5.146 a
0-45	4.023 a	4.585 a	5.630 a
Promedio	3.789 c	4.560 b	5.375 a
Cal acumulada (Mg/ha)			
0-30 cm	1.560	2.260	
0-45 cm	3.000	4.300	

* Valores con letras iguales en la misma característica y sistema no difieren en forma significativa ($P < 5\%$), según la prueba de Duncan.

a. Sistema de cultivo:

- (1) Año 1 (arroz/arroz), año 2 (maíz/millo Perla + leguminosa), año 3 (maíz).
- (2) Año 1 (arroz/pastura, año 2 (maíz/soya), año 3 (maíz).
- (3) Año 1 (arroz + pastura + leguminosa), año 2 (maíz/millo Perla), año 3 (maíz).

Cuadro 7. Rendimiento de grano de maíz, suelo franco arcilloso. Matazul, Llanos Orientales de Colombia.

Tratamientos	Producción de maíz (Mg/ha)		
	Año 2002	Año 2003	
	Maize H-108	Maize H-108	Híbrido comercial
Sistema de cultivo ^a			
1	4.016 b*	4.750 a	6.093 a
2	4.427 a	4.777 a	6.336 a
3	4.474 a	4.585 a	6.158 a
Fuente de cal			
Dolomítica	4.182 b	4.581 a	6.152 a
Sulcamag + cal	4.429 a	4.827 a	6.240 a
Profundidad de cincel (cm)			
0-30	4.208 b	4.602 a	6.116 a
0-45	4.403 a	4.800 a	6.279 a
Promedio	4.306 c	4.703 b	6.196 a
Cal acumulada (Mg/ha)			
0-30 cm	3.640	3.640	
0-45 cm	6.240	6.240	

* Valores con letras iguales en la misma característica y sistema no difieren en forma significativa ($P < 5\%$), según la prueba de Duncan.

a. Sistema de cultivo:

- (1) Año 1 (arroz/arroz), año 2 (maíz/millo Perla + leguminosa), año 3 (maíz).
- (2) Año 1 (arroz/pastura, año 2 (maíz/soya), año 3 (maíz).
- (3) Año 1 (arroz + pastura + leguminosa), año 2 (maíz/millo Perla), año 3 (maíz).

Conclusiones

- En los Cerrados de Brasil, la DA y la porosidad de los suelos no son limitantes para la producción agrícola, como sí lo son en los suelos de sabanas de los Llanos Orientales de Colombia.
- Los resultados de la investigación de campo en el largo plazo mostraron que es necesario mejorar las condiciones físicas, químicas y biológicas de estos suelos antes de ser utilizados en sistemas de no labranza (siembra directa).
- El rendimiento de maíz cultivado después de 5 años de *Panicum maximum* fue mayor que después de 5 años en monocultivo, lo que demuestra la importancia del sistema radicular de la gramínea en el mejoramiento de las condiciones del suelo para la producción de cultivos.

- La producción de maíz en el CNI, en Carimagua, mostró una alta correlación con la profundidad de las raíces.
- En la finca Matazul, Llanos Orientales de Colombia, el concepto *Construcción de una Capa Arable* para mejorar las condiciones físicas, químicas y biológicas del suelo, mediante labranza vertical y el uso de enmiendas, mostró un efecto altamente positivo sobre los rendimientos de grano de maíz.
- La producción de maíz aumentó con el tiempo, lo que indica un marcado mejoramiento de las condiciones del suelo para la producción de cultivos.
- El concepto *Construcción de una Capa Arable* puede ser aplicado en otros suelos tropicales de baja fertilidad con características limitantes similares físicas, químicas y biológicas de los suelos de las sabanas de los Llanos Orientales de Colombia, con el objetivo de aumentar la productividad agrícola y la sostenibilidad para satisfacer las exigencias mundiales futuras de alimentos.

Referencias

- Amézquita E. 1998. Hacia la sostenibilidad de los suelos en los Llanos Orientales de Colombia. En: Manejo de suelos e impacto ambiental. Memorias. IX Congreso Colombiano de la Ciencia del Suelo, Paipa, Boyacá, 21–24 octubre 1998. Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo, Bogotá, DC. p 106–120.
- Amézquita E; Chávez LF; Bernal JH. 2002a. Construcción de una capa arable en suelos pobres: Conceptos esenciales aplicados en la Altilanura. Folleto Divulgativo No. 10. Colciencias-CIAT-Corpoica, Bogotá, Colombia.
- Amézquita E; Friesen D; Rivera M; Rao IM; Barrios E; Jiménez JJ; Decaëns T; Thomas RJ. 2002b. Sustainability of crop rotation and ley pasture systems on the acid-soil savannas of South America. En: Proceedings of the 17th World Congress of Soil Science, Bangkok, Tailandia, 14–21 agosto 2002.
- Amézquita E; Thomas RJ; Rao IM; Molina DL; Hoyos, P. 2004. Use of deep-rooted tropical pastures to build-up an arable layer through improved soil properties of an Oxisol in the Eastern Plains (Llanos Orientales) of Colombia. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 103(2):269–277.
- Campanhola C; Voss J. 2004. Prologue. En: Guimarães EP; Sanz JI; Rao IM; Amézquita MC; Amézquita E; Thomas RJ, eds. *Agropastoral systems for the tropical savannas of Latin America*. Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), Cali, Colombia; Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa), Brasilia, DF, Brasil. p ix.
- Friesen DK; Rao IM; Thomas RJ; Oberson A; Sanz JI. 1997. Phosphorus acquisition and cycling in crop and pasture systems in low fertility tropical soils. *Plant and Soil* 196:289–294.

- Jiménez JJ; Rossi JP; Lavelle P. 2001. Spatial distribution of earthworms in acid-soil savannas of the Eastern Plains of Colombia. En: Jiménez JJ; Thomas RJ, eds. *Nature's plow: Soil macroinvertebrate communities in the neotropical savannas of Colombia*. Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), Cali, Colombia. p 104–120.
- Le Mare PH; León LA. 1989. The effects of lime on adsorption and desorption of phosphate in five Colombian soils. *Journal of Soil Science* 40(1):59–69.
- Lopes AS; Ayarza M; Thomas RJ. 2004. Managing and conserving acid savanna soils for agricultural development: Lessons from the Brazilian *Cerrados*. En: Guimarães EP; Sanz JI; Rao IM; Amézquita MC; Amézquita E; Thomas RJ, eds. *Agropastoral systems for the tropical savannas of Latin America*. Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), Cali, Colombia; Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa), Brasília, DF, Brasil. p 11–41.
- Soil Survey Staff. 1994. *Keys to soil taxonomy*. Pocahontas Press, Blacksburg, VA, Estados Unidos.
- Thomas RJ. 2004. Preface. En: Guimarães EP; Sanz JI; Rao IM; Amézquita MC; Amézquita E; Thomas RJ, eds. *Agropastoral systems for the tropical savannas of Latin America*. Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), Cali, Colombia; Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa), Brasília, DF, Brasil. p xi–xii.
- Vera RR. 2004. Research on agropastoral systems: Background and strategies. En: Guimarães EP; Sanz JI; Rao IM; Amézquita MC; Amézquita E; Thomas RJ, eds. *Agropastoral systems for the tropical savannas of Latin America*. Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), Cali, Colombia; Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa), Brasília, DF, Brasil. p 3–10.
- White RE. 1997. *Principles and practice of soil science: The soil as a natural resource*. 3rd ed. Blackwell Science, Oxford, Reino Unido. 348 p.

Impacto de los Organismos del Suelo en la Diversidad Vegetal y la Abundancia: Estudio de Caso de una Especie Nativa de Lombriz de Tierra Anécica

J. J. Jiménez¹, R. Thomas², M. Fisher³, N. Asakawa⁴, T. Decaëns⁵, P. Lavelle⁶ y L. Mariani⁷

Resumen

Dado que las lombrices de tierra son el grupo más abundante de la macrofauna del suelo en términos de biomasa y, por lo general, participan en la regulación de procesos importantes del suelo a través de sus dominios funcionales, se llevó a cabo un estudio cuyo objetivo principal fue evaluar algunos procesos ecológicos a escala de la estructura biogénica de *Martiodrilus* sp. (lombriz de tierra anécica endémica de Carimagua), relacionarlos con los hábitos de vida de la especie y evaluar los efectos sobre los bancos de semillas permanentes en la superficie de sus heces. El estudio se realizó dentro del Convenio CIAT-Corpoica (Centro Internacional de Agricultura Tropical-Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria), en el Centro Nacional de Investigación (CNI) en Carimagua, en las sabanas bien drenadas isohipertérmicas de los Llanos Orientales de Colombia (4° 37' N, 71° 19' O y 175 m.s.n.m.). Toda la investigación se llevó a cabo en la misma unidad de las tierras altas edáficas (pedón Carimagua), donde se ubicaron las diferentes parcelas: (1) una sabana sin pastoreo ni quemadas, en la que *Andropogon bicornis* y *Gymnopogon* sp. fueron las especies vegetales predominantes, y (2) una pastura en una parcela de 2 ha que combina un pasto exótico africano, *Brachiaria decumbens* cv. Basilisk y una leguminosa herbácea tropical, *Pueraria phaseoloides* CIAT 9900 ("kudzu"). Las tasas de carga de ganado fueron: 1 unidad animal (UA) por hectárea en la estación seca y 2 UA por hectárea en la estación húmeda

-
1. Ecología/Biodiversidad, Instituto Pirenaico de Ecología-Consejo Superior de Investigaciones Científicas (IPE-CSIC), Jaca, España. jjimenez@ipe.csic.es
 2. United Nations University, International Network on Water, Environment and Health (UNU-INWEH), Hamilton, Ontario, Canadá. contact@inweh.unu.edu
 3. Fisiología/Modelación de cultivos, Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), Cali, Colombia. mylesjfisher@gmail.com
 4. Microbiología de suelos, CIAT. n.asakawa@cgiar.org
 5. Ecología de suelos, Laboratoire d'Ecologie, Université de Rouen, Mont-Saint-Aignan, Francia. thibaud.decaens@univ-rouen.fr
 6. Ecología de suelos, Institut de recherche pour le développement (IRD), CIAT. p.lavelle@cgiar.org
 7. Ecología de suelos, Universidad de Alberta, Edmonton, Canadá. lucero.mariani@ualberta.ca

(1 UA = 250 kg de peso vivo). Los resultados del presente estudio confirmaron el complejo papel desempeñado por las lombrices en el proceso de formación del banco de semillas y su contribución a la vegetación del suelo. En tales sistemas, el número de semillas viables liberadas cada año en la superficie de las heces superficiales de *Martiodrilus* sp. es importante (hasta 8.7 millones de semillas por hectárea por año), en comparación con los resultados obtenidos con *Lumbricus terrestris* L. en pastizales templados (890 mil semillas por hectárea por año, en promedio). De 18 a 878 semillas viables por metro cuadrado por año pudieron ser liberadas en las heces superficiales, lo que representó entre 1 y 13% del total del banco de semillas viables del suelo.

Palabras claves: Oxisoles, macrofauna de suelo, *Martiodrilus* sp., regulación de procesos del suelo, banco de semillas

Introducción

La sustitución de la sabana nativa por pastos introducidos de África ha sido una práctica ampliamente aceptada en los Llanos colombianos y en las sabanas brasileñas o "Cerrados" durante los últimos 20 años, con el fin de aumentar la proporción de las tierras utilizadas para la producción de una alimentación más intensiva. Pasturas mejoradas basadas en pastos introducidos de África, principalmente *Brachiaria* spp. y *Panicum* spp., con o sin leguminosas forrajeras, por ejemplo *Stylosanthes* sp., *Arachis* sp. y *Pueraria* sp., y los cultivos anuales con el uso de fertilizantes y cal, principalmente arroz y soya en las zonas altas, son las opciones de manejo de la tierra que normalmente se encuentran en estas áreas. Además se sabe poco acerca de los procesos biológicos implicados en estos cambios de uso del suelo y cómo se pueden alterar los procesos fundamentales y servicios ecosistémicos. Esto es especialmente relevante cuando es evidente, a partir de estudios realizados en los "Cerrados" brasileños, que la biodiversidad de las sabanas neotropicales está más amenazada que la de la selva amazónica. El estudio de la diversidad y los procesos ecológicos vinculados al funcionamiento de los ecosistemas constituyen la base del entendimiento y un mejor manejo de los ecosistemas naturales y derivados. Las comunidades de fauna del suelo son, en general, sensibles a los factores climáticos y edáficos que, a su vez, determinan la disponibilidad de recursos alimenticios y las condiciones microclimáticas. Además, la perturbación inducida por el hombre en los ecosistemas naturales altera las comunidades de macroinvertebrados en el suelo.

Las lombrices de tierra son el grupo más abundante de la macrofauna del suelo en términos de biomasa y, por lo general, participan en la regulación de procesos importantes del suelo a través de sus dominios funcionales. Los efectos de las lombrices de tierra en las propiedades físicas del suelo, la dinámica de nutrientes, materia orgánica y crecimiento de las plantas se han estudiado en detalle. Sin embargo, se necesitan más esfuerzos para evaluar el papel de las estructuras biogénicas producidas por estos organismos en el funcionamiento del suelo y los procesos ecológicos. La sustitución de los ecosistemas naturales (sabana nativa) por pasturas introducidas influye en la estructura funcional de las comunidades de lombrices,

aunque la riqueza de especies es la misma. *Andropogon gayanus* y *Brachiaria decumbens*, solos o en asociación con leguminosas, *Pueraria phaseoloides*, *B. humidicola*, solas o en asociación con *Arachis pintoii* u otras leguminosas, son los sistemas que conservan la macrofauna nativa en Carimagua. Estos resultados son excepcionales, así como las perturbaciones en los sistemas naturales resultarán generalmente en una disminución o desaparición de las especies nativas. Normalmente, las especies pantropicales con una amplia gama de tolerancia a las propiedades físico-químicas (especies peregrinas), tales como *Pontoscolex corethrurus* Müller y *Polypheretima elongata* Perrier pueden llegar a ser predominantes. De las muchas formas de vida que habitan en los suelos, solo un pequeño número de macroinvertebrados (lombrices, termitas y hormigas) son capaces de arar el suelo y producir una gran variedad de estructuras órgano-minerales, por ejemplo, nidos, montículos, macroporos, galerías y excreciones. Estos organismos se denominan “ingenieros ecológicos” de la tierra, y sus estructuras se han descrito como “estructuras biogénicas”. De acuerdo con la riqueza de especies de la sabana, en Carimagua existe una alta diversidad funcional, en términos de las diferentes estructuras biogénicas. Los ingenieros de suelos ecológicos de Carimagua producen 14 tipos de estas estructuras en la superficie del suelo, es decir, 4 estructuras de termitas, 8 tipos de nidos de hormigas y 2 tipos de lombrices. El anécico *Martiodrilus* sp. es una de estas estructuras biogénicas, y las especies que los producen (Glossocolecidae, Oligochaeta) son el centro de esta investigación.

Estas deposiciones de superficie tienen forma de torre (turriformes) y están formadas por una deposición continua de material liberado en la apertura de la galería durante varios días. La estructura final es una torre con una consistencia pastosa fresca en el material de la parte superior y seca en su base y fácilmente reconocible desde la superficie del suelo. El término “turriforme” fue escogido de la descripción que D. S. Madge utilizó originalmente para describir las heces de *Hyperiodrilus africanus*. Cuando la lombriz de tierra *Martiodrilus* sp. deja su galería semi-permanente en forma de U o cuando descienden del suelo para iniciar la diapausa, las heces se secan por completo. Las heces secas se mantienen en la superficie del suelo durante más de un año después de haber sido producidas, y la desaparición de las heces se atribuye principalmente a los impactos de la lluvia y al pisoteo del ganado en los potreros pastoreados. Se cree que el papel funcional de estas estructuras es de suma importancia y representa sitios donde ocurren ciertos procesos pedológicos. Éstos incluyen la estimulación de la actividad microbiana, la formación de la estructura del suelo, la dinámica de la materia orgánica del suelo o el intercambio de agua y gases.

El objetivo de este estudio fue evaluar algunos procesos ecológicos a escala de la estructura biogénica y relacionarlos con los hábitos de vida de la especie. Los efectos sobre los bancos de semillas permanentes en la superficie de las heces de *Martiodrilus* sp. fue el objetivo principal abordado en este estudio.

Materiales y métodos

Sitio de estudio

El estudio se realizó dentro del Convenio CIAT-Corpoica (Centro Internacional de Agricultura Tropical-Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria), en el Centro Nacional de Investigación (CNI) en Carimagua, en las sabanas bien drenadas isohipertérmicas de los Llanos Orientales de Colombia (4° 37' N, 71° 19' O y 175 m.s.n.m.). El clima es tropical subhúmedo con un período seco de 4 meses, de diciembre a marzo, y una precipitación media anual y temperatura de 2240 mm y 27 °C, respectivamente. La vegetación se caracteriza por sabanas herbáceas abiertas con árboles dispersos y arbustos en las zonas altas ("altos") y bosques de galería y palmeras ("morichales") en las sabanas de tierras bajas (los "bajos"). La quema se utiliza para deshacerse del exceso de vegetación y estimular el nuevo crecimiento de los materiales vegetales más nutritivos. Los suelos en el área de estudio son Oxisoles (Tropeptic Haplustox Isohipertérmicos) en las tierras altas y Ultisoles (Ultic Aeric Plintaquox) en las tierras bajas (en el sistema de USDA). Estos suelos se caracterizan por su acidez (pH 4.5, agua), una alta saturación de Al (>80%) y bajas concentraciones de los cationes intercambiables Ca, Mg y K. El P es un nutriente limitante para las plantas, ya que mantiene fijo el Al en compuestos estables, lo que reduce la productividad de los suelos ácidos. Toda la investigación se llevó a cabo en la misma unidad de las tierras altas edáficas (pedón Carimagua), donde se ubicaron las diferentes parcelas: (1) una sabana sin pastoreo ni quemas, donde *Andropogon bicornis* y *Gymnopogon* sp. fueron las especies vegetales predominantes, y (2) una pastura en una parcela de 2 ha que combina un pasto exótico africano, *B. decumbens* cv. Basilisk y una leguminosa herbácea tropical, *Pueraria phaseoloides* CIAT 9900 ("kudzú"). Las tasas de carga de ganado fueron: 1 unidad animal (UA) por hectárea en la estación seca y 2 UA por hectárea en la estación húmeda (1 UA = 250 kg de peso vivo).

Muestreo de la población de lombriz de tierra

Con el objetivo de evaluar la biología, la ecología y la dinámica de poblaciones de las especies a través del tiempo, se efectuó un muestreo estratificado durante 17 meses. Los métodos físicos de extracción se aplicaron para recoger las lombrices de tierra. Éstos son a menudo muy tediosos, duros y requieren de mucho tiempo. Desde abril de 1994 hasta septiembre de 1995, las lombrices se recogieron mensualmente de cinco monolitos de suelo de 1 m². Una zanja se excavó alrededor del monolito para evitar que algunas lombrices se escaparan, y para facilitar, de este modo, la separación sucesiva de las capas de 10 cm de espesor. Normalmente se revisaron cinco capas de suelo hasta 50 cm. Sin embargo, como algunas especies migran más profundamente en el suelo, por ejemplo *Martiodrilus* sp., la profundidad de muestreo varió. En el muestreo, la distribución vertical no se vio afectada tanto, ya que existe una correlación positiva entre el número de heces frescas en la superficie del suelo y la cantidad de lombrices de tierra en la capa superficial del suelo. Los bloques de suelo se revisaron cuidadosamente a mano y todas las lombrices y capullos se colectaron. Si cualquier lombriz de tierra estaba en fase inactiva, es decir, quiescencia o diapausa, fue

anotado. Todas las lombrices se llevaron al laboratorio, donde los especímenes completos se pesaron y el diámetro máximo preclitelar se midió en aquellos fragmentados, ya que ha sido muy útil para estimar el peso de la lombriz completa. La biomasa se basó en la preservación en formalina, un 12% menor que el peso fresco promedio para *Martiodrilus* sp.

Muestreo de las estructuras biogénicas: Las heces y los bancos de semillas del suelo

Se seleccionaron tres parcelas experimentales para comparar la sabana nativa con diferentes sistemas de pastoreo bajo estudio en el sitio de la investigación:

- a. Una sabana nativa de *Paspalum pectinatum* Nees, *Axonopus purpusii* (Mez.) Chase y *Trachypogon vestitus* Anders, protegida del pastoreo durante 4 años y manejada tradicionalmente con quemas durante cada temporada seca.
- b. Una pastura asociada de 18 años de establecida, de *B. decumbens* Stapf. y *P. phaseoloides* Benth. (Pastizal A), pastoreada por el ganado y mantenida con una carga animal de 1.0 UA/ha durante la estación seca y 2.0 UA/ha durante la temporada de lluvias.
- c. Una pastura de 3 años de establecida, asociada con *B. humidicola* (Rendle), *A. pintoi* Krap & Greg, *S. capitata* Vog. y *C. acutifolium* Benth. (Pastizal B), pastoreada por el ganado con una carga animal promedio de 2.0 UA/ha. El trabajo de campo se llevó a cabo en agosto de 1996 y agosto de 1999, es decir, a la mitad del período de lluvias.

La idea era tomar muestras del banco de semillas permanente del suelo, asumiendo que la mayoría de los bancos de semillas temporales habían germinado ya en el inicio de la temporada de lluvias. De cada parcela experimental se tomaron 20 muestras de suelo (8 cm de diámetro y 6 cm de profundidad) y se recogieron al azar 300 heces frescas. Tanto el suelo como las heces se secaron al aire durante 15 días y se pesaron. Cada muestra fue puesta en una capa de 2 cm de arena de río en una bandeja de plástico para semillas (26 × 27 × 6 cm). Las capas de suelo fueron de menos de 5 mm, con el fin de permitir la germinación de la mayor parte de las semillas, tal como lo recomiendan algunos autores. Se utilizaron 40 bandejas para cada parcela (20 para cada tipo de muestra, es decir, del suelo y heces) y 10 se llenaron con arena sola y se utilizaron como control. Las bandejas de germinación se ubicaron al azar en un invernadero y se mantuvieron húmedas y expuestas a la luz natural y a los regímenes de temperatura (aproximadamente 12 h luz/12 h oscuridad y 26 °C, respectivamente). Una vez por semana, las plántulas emergentes fueron identificadas a nivel de especie y se retiraron. Después de 3 meses, las heces se rompieron en fragmentos pequeños (<5 mm de diámetro) antes de colocarse en las bandejas para continuar la evaluación. Para cada muestra se tomaron al azar 40 g de suelo seco o heces al comienzo del experimento. Cada muestra se empapó durante un mínimo de 30 min en una solución de hexametáfosfato de sodio (50 g/L) y bicarbonato de sodio (25 g/L). Después, la suspensión se vertió a través de

un tamiz de 0.125 mm. Los desechos orgánicos se lavaron con un spray fino de agua y se secaron al horno durante 48 h a 70 °C. Tanto las semillas dañadas como las no dañadas (es decir, las semillas que visualmente parecían estar intactas y resistieron la presión suave) se separaron bajo un estéreo-microscopio y se contaron.

Estadística

Se utilizó un análisis de regresión lineal simple (Pearson r) para estudiar la correlación entre las variables. Se usó un análisis de la varianza (ANOVA) para probar las diferencias significativas entre las medias, así como el ANOVA no paramétrico de Kruskal Wallis para comparar las variables bajo el supuesto de diferencias de tamaño de la muestra. La asimetría de la distribución de frecuencias de datos se redujo por transformación Box-Cox con el software VerNorm.

Resultados y discusión

Ecología de la especie

Martiodrilus sp. es una lombriz de tierra anécica endémica de Carimagua. Es de gran tamaño, dorsalmente pigmentada de color gris oscuro. Son especies que depositan heces superficiales. Las heces de *Martiodrilus* sp. son grandes y midieron entre 3 a 6 cm de diámetro y 2 a 10 cm de altura, con un peso seco promedio de 25 g (Foto 1). El promedio mensual de heces frescas y del número total de heces fue significativamente mayor ($P < 0.01$, t-test) en el pastizal que en la sabana nativa. El número de heces en la superficie disminuyó durante la mitad del período de lluvias, debido al hecho de que todos los jóvenes ya habían descendido a las capas más profundas para entrar en diapausa. En el pasto mejorado se observó una fuerte correlación positiva entre el número de heces frescas y la densidad de los individuos en los primeros 10 cm ($r = 0.907$, $P < 0.01$); ha demostrado ser un buen estimador de densidad de población.



Foto 1. Turrículo de *Martiodrilus* sp. en la sabana nativa de Carimagua (escala: longitud de imagen = 20 cm). (Foto de T. Decaëns.)

La densidad de población más alta se registró en el inicio de la temporada de lluvias, y los nuevos juveniles nacidos en octubre de 1994 aumentaron el número total de individuos, a pesar de una reducción en el número de éstos, debido a la estacionalidad severa.

La biomasa de las lombrices varió de 0.24 g/m² (marzo de 1994) a 8.76 g/m² (septiembre de 1995) y de 26.5 g/m² (enero de 1995) a 94.8 g/m² (mayo de 1994) en la sabana nativa y en el pasto mejorado, respectivamente. En el ecosistema nativo, *Martiodrilus* sp. contribuyó con un 15.1% a la biomasa total, mientras que este valor se elevó a 85.1% en el pasto mejorado, el más alto jamás registrado hasta la fecha para una especie anécica. La densidad de la población se mantuvo estable durante los meses de la estación seca; por lo tanto, se supone que la mortalidad se produjo durante el período de lluvias y que otros factores pudieron ser responsables de ello. La estrategia adaptativa de *Martiodrilus* sp. es muy eficaz. Es por ello que existe un riesgo mínimo de mortalidad durante la estación seca. La especie presentó una diapausa verdadera, aunque se encontraron diferentes patrones entre los adultos y los jóvenes. Estos últimos solo fueron activos durante los 4 meses siguientes al inicio de la temporada de lluvias y entraron en diapausa mucho antes que los adultos, que se mantuvieron activos hasta diciembre. La inactividad se produjo después de que se desplazaron a las capas más profundas del suelo. Se construyó una cámara de estivación al final de la galería semipermanente, en la que ellos se enrollaron, después de haber vaciado su contenido intestinal. El final de la galería fue sellada, por lo general, con varios tabiques para evitar la pérdida de humedad del tegumento, que es vital para mantener una tasa mínima de respiración (Foto 2). Permanecieron así hasta el comienzo de la siguiente temporada de lluvias.



Foto 2. Modelo de la diapausa en *Martiodrilus* sp. con la cámara de estivación al final de la galería (línea de puntos) y los tabiques (flechas), construidos con material de deposición. (Foto de J. J. Jiménez.)

Se produjo un proceso comprobado de diapausa, fisiológicamente inducido, debido a que en condiciones controladas no hubo respuesta cuando las lombrices de tierra en estivación se introdujeron en suelos con contenido de agua cerca de la capacidad de campo. La estivación de lombrices juveniles se encontró normalmente entre 40 a 50 cm, mientras que los adultos y subadultos se ubicaron en la capa 50 a 60 cm. Se encontró una correlación no lineal significativa entre el peso de las lombrices en diapausa y la profundidad en la que se encontraron (Kruskal-Wallis ANOVA, $P = 0.011$). Cuanto mayor fue el individuo, más profundamente realizó la estivación (Figura 1). El peso promedio de las lombrices de tierra en diapausa se encontró en un rango de 1.0 a 2.5 g (4 g máximo), muy bajo si se compara con el peso adulto fresco, cerca de 11.2 g. Éste fue el resultado después de vaciar sus intestinos antes de enrollarse en las cámaras de estivación.

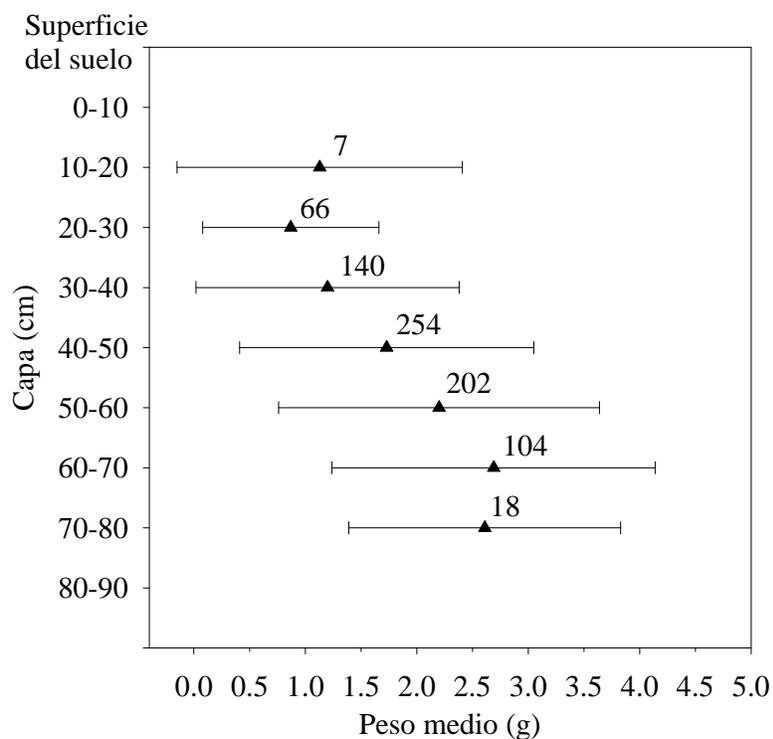


Figura 1. Relación entre la distribución vertical de la estivación de individuos de *Martiodrilus* sp. en el perfil del suelo y su peso.

Debido al ciclo de vida de la especie, se consideró un claro estrategia K con un período de vida relativamente largo. Nuevos juveniles provenientes de los capullos, justo antes del final del período lluvioso, se dirigieron rápidamente hacia los horizontes más profundos para iniciar la diapausa. En el siguiente año fueron activos en el inicio de la temporada de lluvias y así durante los siguientes 3-4 meses (julio-agosto), entrando de nuevo en una fase de diapausa (el peso de estos jóvenes fue de 4 g máximo) hasta la próxima temporada de lluvias. Al comienzo del siguiente período de lluvias (segundo año), estas lombrices estuvieron activas hasta la mitad o

al final de la temporada lluviosa, dependiendo de la etapa de desarrollo. En el año siguiente (3°), estos individuos se convirtieron en adultos, por lo que se consideraron dos posibilidades: (i) estos nuevos adultos no se reproducirían hasta el próximo año (4°), ya que se encontraron algunos adultos inactivos, aun cuando no se recogió ningún capullo (ver más abajo) o (ii) en algunos años de inusuales precipitaciones inferiores, toda reproducción se iniciará por la mayoría de los adultos. Los adultos que constituyeron, en un período determinado, la población de *Martiodrilus* sp., parecieron no participar activamente en la reproducción, ya que el número de adultos era el doble del de capullos. De hecho, se hace caso omiso de si estos adultos participaron en el período reproductivo, pero parece improbable ya que no se encontraron capullos al inicio de la temporada de lluvias.

Efecto de *Martiodrilus* sp. sobre la diversidad de plantas a la escala de las estructuras biogénicas

Bancos de semillas

Martiodrilus sp. pareció ingerir grandes cantidades de semillas preferentemente como parte de su dieta, de 58 a 163 semillas por cada 100 g de suelo ingerido. El porcentaje de germinación de las semillas fue de 3 a 40 veces más baja en las heces de las lombrices que en el suelo, probablemente como consecuencia de los daños sufridos por las semillas ingeridas durante el tránsito intestinal.

En todos los sistemas de las plantas de semillero provenientes de las heces de lombriz se observó que solo el 41% de las semillas surgió a partir de las heces, y el restante 59% necesitó la destrucción de la misma para germinar (datos no presentados). Además, el número de semillas viables en las heces fueron insignificantes, en comparación con el banco de semillas del suelo y solo representaron el 0.2-0.6% del total (Figura 2). Sin embargo, el número total de semillas recogidas en 100 g de muestra fue normalmente más alto en las heces que en el suelo, y el número de semillas viables fue mayor en los pastos intensivos que en la sabana nativa, y en todos los sistemas fue mayor en el suelo, en comparación con las heces.

Se encontraron diferencias en la composición de las especies del banco de semillas del suelo entre las pasturas y la sabana, y similar entre las dos pasturas. La composición de especies de los bancos de semillas del suelo era muy diferente a la vegetación sobre el suelo, donde las especies dominantes no germinaron en el invernadero y, por otro lado, las especies más abundantes de las plantas germinadas en el invernadero eran raras en la comunidad de plantas.

El banco de semillas de las heces fue relativamente cercano al de la vegetación existente de los bancos de semillas del suelo de la sabana nativa, mientras que el patrón opuesto se encontró en los pastos *B. decumbens* y *P. phaseoloides*. El número de semillas viables liberadas en las heces de *Martiodrilus* sp. fue hasta de 8.7 millones de semillas por hectárea por año, y 18 a 878 semillas viables por metro cuadrado por año, lo que representa entre

1 y 13% del total del banco de semillas viables del suelo. Entre un 64 y 97% de viabilidad de la semilla se perdió en las heces de las lombrices, probablemente debido a los daños sufridos por las semillas durante el tránsito intestinal, como lo sugiere el mayor porcentaje de semillas dañadas observadas en las heces.

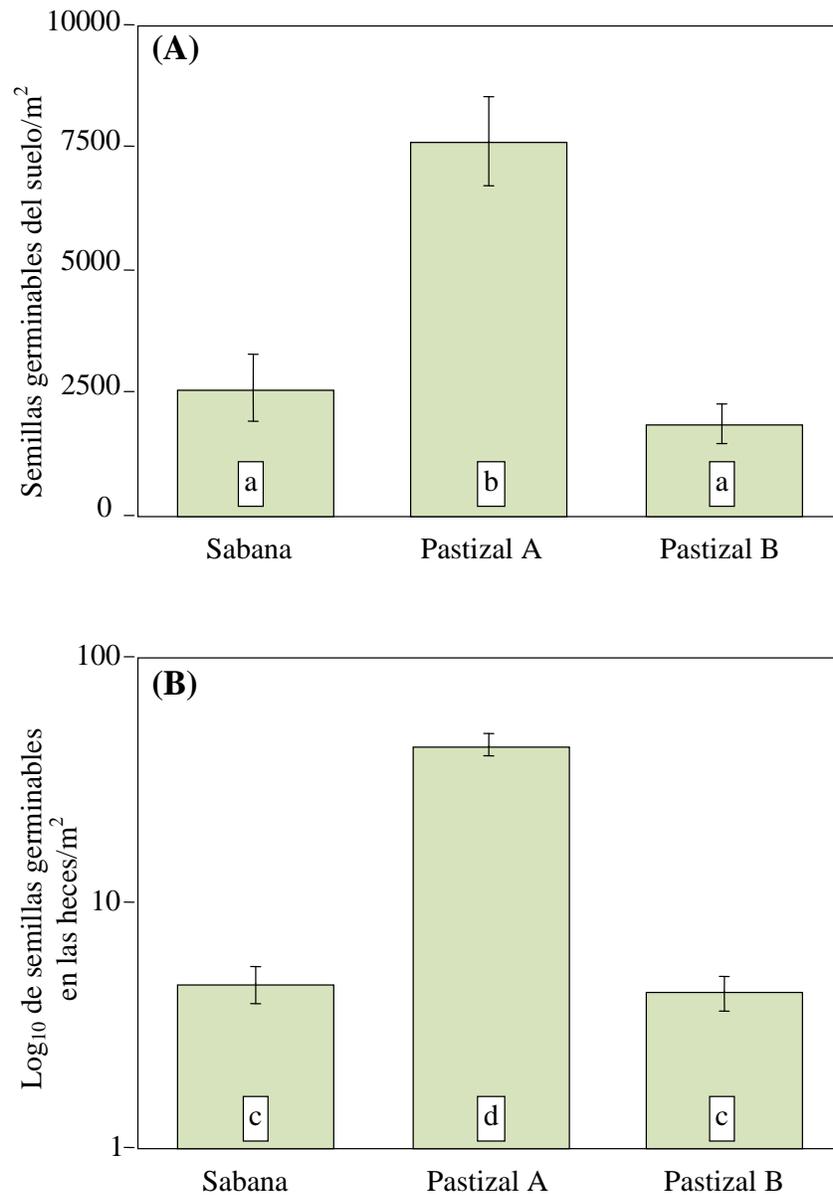


Figura 2. Densidad de semillas contenidas en suelos (A) y en heces (B) en tres sistemas. Las barras indican el error estándar y las letras diferencias significativas a $P < 0.05$ (t test).

Las heces de *Martiodrilus* sp. a veces fueron grandes y alcanzaron hasta 15 cm de altura y 400 g de peso. Éstas no se secaron completamente hasta que la lombriz abandonó su galería; la vida media de las heces es entre 1 y 3 semanas en pasturas nativas y no nativas, respectivamente. Después, las heces se rompieron progresivamente, hasta que desaparecieron por completo, a veces por la escorrentía del agua después de una gran tormenta o su incorporación dentro del perfil del suelo.

Los resultados del presente estudio confirmaron el complejo papel desempeñado por las lombrices en el proceso de formación del banco de semillas y su contribución a la vegetación del suelo. En tales sistemas, el número de semillas viables liberadas cada año en la superficie de las heces superficiales de *Martiodrilus* sp. es importante (hasta 8.7 millones de semillas por hectárea por año), en comparación con los resultados obtenidos con *Lumbricus terrestris* L. en pastizales templados (890 mil semillas por hectárea por año, en promedio). De 18 a 878 semillas viables por metro cuadrado por año pudieron ser liberadas en las heces superficiales, lo que representó entre 1 y 13% del total del banco de semillas viables del suelo.

En este estudio, entre un 64 a 97% de la viabilidad de la semilla se perdió en las heces de las lombrices, probablemente debido a los daños sufridos por las semillas durante el tránsito intestinal, como lo sugirió el mayor porcentaje de semillas dañadas observadas en las heces. La actividad de la lombriz de tierra en enterrar semillas pudo tener consecuencias importantes para la dinámica de las comunidades vegetales, debido a que las semillas de muchas especies sobrevivieron mejor cuando eran dejadas en la superficie del suelo, y hay pocos mecanismos naturales que explican cómo las semillas están enterradas en el suelo. Además, las heces de lombrices de tierra pueden proteger a las semillas a partir de procesos de germinación temprana y participar en la formación de bancos de semillas importantes y persistentes.

En la sabana protegida del fuego, las heces a veces permanecieron en la superficie durante más de un año, mientras que la quema de la sabana condujo a su destrucción, privándola del efecto protector de la vegetación y la cubierta de la materia vegetal. Esto puede conducir a la formación de un grupo de semillas potencialmente listas para germinar, que pueden ser dispersadas indirectamente por el fuego en la superficie del suelo por la zona donde más se benefician de las condiciones adecuadas para germinar (suelo desnudo, es decir, una mayor intensidad de luz, nutrientes disponibles en cenizas).

Importantes limitaciones químicas en el estado de germinación de las plántulas y la supervivencia (por ejemplo, bajo contenido de nutrientes, alta saturación de Al) también pudieron ser aliviadas en las heces. Por lo tanto, las semillas en las heces liberadas en la superficie del suelo pudieron ser más propensas a germinar que en el banco de semillas. Esto pudo explicar por qué la composición del banco de semillas de las heces estaba más cerca de la vegetación de la sabana a la del propio banco de semillas del suelo. Las investigaciones futuras deberían centrarse en los efectos de la actividad de las lombrices en la vegetación a mayores escalas espaciales y temporales.

Impacto

Martiodrilus sp. es una lombriz de tierra endémica de las sabanas naturales de Carimagua (Colombia) adaptadas a los pastos introducidos, donde aumentan significativamente su abundancia y sus efectos en algunos procesos del suelo. Las estrategias de adaptación de las lombrices de tierra son diversas y son el resultado de vivir en un entorno complejo y frente a factores limitantes como pobre contenido de nutrientes, el movimiento en un entorno compacto y, a veces, una fuerte estacionalidad. Esta especie mantiene poblaciones muy abundantes en los pastos introducidos y su estrategia de adaptación es extremadamente eficiente para mantener una densidad casi constante durante la estación seca. Las heces de las lombrices se podrían considerar como un nicho importante para la regeneración de la comunidad vegetal, y la actividad de las lombrices puede ser un factor indispensable de la sostenibilidad de los ecosistemas y la diversidad.

Referencia

CIAT (Centro Internacional de Agricultura Tropical). 2001. The impact of soil organisms on plant diversity and abundance. A case of study of a native anecic earthworm species. En: Overcoming Soil Degradation through Productivity Enhancement; Annual Report 2001. Cali, Colombia. p 93–100.

PARTE III

Impacto Económico de las Investigaciones en Culticore

Análisis Económico de una Estrategia para el Manejo de Suelos en la Altiplanura Colombiana: Construcción de la Capa Arable

L. Rivas¹, E. Amézquita², P. Hoyos³ y D. L. Molina⁴

Resumen

La degradación de los suelos es un problema a escala global que limita la producción de alimentos, la competitividad y la seguridad alimentaria, en particular en los países pobres que dependen, en gran medida, de la agricultura como fuente de alimentos y de empleo.

Se estima que en el mundo existen aproximadamente 2 billones de hectáreas, casi una cuarta parte de los recursos de tierras disponibles por el hombre para usos productivos, afectadas de alguna manera por problemas de degradación. En muchas oportunidades la degradación de los suelos solo se aprecia a largo plazo, ya que la incorporación progresiva de mayor cantidad de insumos (fertilizantes, correctivos, etc.) disimula temporalmente sus efectos negativos, conservando el nivel de los rendimientos, pero incrementando los costos de producción y deteriorando la competitividad.

En la Orinoquia nacional se tiene una enorme extensión de áreas de sabana con un gran potencial productivo, pero muy susceptibles a la degradación física, química y biológica, tan pronto se establecen cultivos comerciales.

Dentro del marco del Convenio de Cooperación Técnica y Científica MADR-CIAT (Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural-Centro Internacional de Agricultura Tropical), el Proyecto de Suelos del CIAT y varias instituciones nacionales colaboradoras han diseñado nuevas alternativas para el manejo y la conservación de los suelos de esa región. Estas técnicas giran alrededor del concepto “*Construcción de una Capa Arable*”, que busca transformar suelos frágiles y de baja productividad, en recursos de alta calidad, mediante prácticas planificadas de mejoramiento físico, químico y biológico.

-
1. Economista, Consultor. rivas000@emcali.net.co
 2. Física de suelos, Consultor Internacional. eamezquitac@gmail.com
 3. Zootecnia, Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (Corpoica), C.I. La Libertad, Villavicencio, Colombia. fhoyosgarces@gmail.com
 4. Suelos/Agronomía, Centro de Investigación en Palma de Aceite (Cenipalma), Bogotá, Colombia. dmolina@cenipalma.org

Este estudio evalúa la rentabilidad económica a escala micro, de tres alternativas de construcción de la capa arable en la altillanura oriental del país. Las secuencias de actividades de las alternativas evaluadas se estructuran así:

- *Opción 1:* (1) Siembra y establecimiento, durante un año, de una pradera compuesta por una gramínea y una leguminosa. (2) Ciclo de pastoreo de 2 a 3 años, durante el cual se desarrollan actividades de ceba de novillos. (3) Establecimiento de un sistema de rotación semestral de cultivos maíz-soya, durante un año. Transcurrido un lapso de 4 a 5 años, la capa arable queda construida.
- *Opción 2:* Es similar a la primera, con la diferencia de que su primer componente, el establecimiento de la pastura, incluye adicionalmente un cultivo. En este caso se establece una gramínea + leguminosa + arroz. El período de construcción de la capa arable va de 4 a 5 años.
- *Opción 3:* Se inicia con una serie de rotaciones semestrales de cultivos (arroz-maíz) por un lapso de 2 a 3 años, para posteriormente establecer una pastura asociada con un cultivo (maíz). Se estima que la formación de la capa arable tarda entre 3 y 4 años.

La información de costos, inversiones y rendimientos fue aportada por el Proyecto de Suelos del CIAT, con base en los trabajos de campo desarrollados por este grupo en la altillanura colombiana.

El estudio simula un ciclo de 10 años de producción para cada una de las alternativas evaluadas. Con el fin de determinar su conveniencia económica, se calculan dos indicadores de rentabilidad: Valor presente neto (VPN) y tasa interna de retorno (TIR).

Las opciones consideradas son atractivas desde el punto de vista económico; no obstante, la tercera opción presenta los mejores indicadores de rentabilidad: 57% de retorno anual, frente a 20 y 37% de las alternativas 1 y 2, respectivamente.

Se efectuó un análisis de sensibilidad de los índices de rentabilidad ante condiciones adversas tales como bajas en los precios de los cultivos y del ganado y reducciones de la capacidad de carga de las pasturas y de los rendimientos de los cultivos.

Se concluye que los cambios no deseados en las variables relacionadas con los cultivos (precios y rendimientos) tienen mayor incidencia sobre la rentabilidad, que las variaciones asociadas con el componente ganadero. Esto implica que los primeros constituyen la principal fuente de riesgo. Adicionalmente, el establecimiento de pasturas asociadas con cultivos otorga una clara ventaja a las alternativas 2 y 3, en términos de viabilidad financiera y rentabilidad económica. Esto último es de crucial importancia para los productores de escasos recursos, con pocas posibilidades de obtener crédito institucional.

La estructura de los costos de establecimiento, tanto de las pasturas como de los cultivos, muestra una elevada participación de la fertilización y la maquinaria, dentro de los costos directos totales (entre 72 y 83%). En consecuencia, toda estrategia dirigida a bajar los costos de establecimiento debe enfatizar en estos dos elementos de costo.

Los proyectos de formación de la capa arable en las fincas de la región deben enmarcarse dentro de una perspectiva de mediano y largo plazo. Si se estiman los indicadores de rentabilidad, considerando solamente el período exacto que se requiere para la construcción de la capa arable, se encuentra que las alternativas 1 y 2 no resultarían rentables. Esto indica que, una vez mejorado el suelo, la actividad productiva debe continuar para recuperar la totalidad de los fondos invertidos.

Se evidencia que la opción 3 resulta ser la más sólida ya que, aparte de mostrar niveles de rentabilidad mayores, presenta la particularidad de que los fondos invertidos en su implementación se recuperan más rápidamente.

Las rotaciones de pastos y de cultivos generan mayor eficiencia en el uso de los insumos, particularmente de los fertilizantes, ya que el aprovechamiento de la fertilización residual conduce a reducciones significativas en los costos de establecimiento.

La implementación de la tecnología de capa arable a gran escala en la altillanura del país representa un cambio técnico de gran magnitud con significativos efectos económicos y ambientales. En el contexto micro, los efectos económicos esperados se manifiestan en avances de la productividad, diversificación de la producción e incrementos de los ingresos y la rentabilidad de las inversiones. A escala regional y nacional, la adopción masiva de estas tecnologías conservacionistas implicaría la ampliación y diversificación de la oferta agregada de alimentos y materias primas, con impactos positivos sobre los niveles nutricionales de la población, el ritmo de crecimiento económico general y la preservación del capital nacional en recursos naturales y biodiversidad.

Para lograr estas metas se requieren profundos cambios en la mentalidad del productor típico de la región, que se especializa como agricultor o como ganadero. Las soluciones propuestas para el manejo de los suelos de la región implican el desarrollo de unidades productivas más complejas que las tradicionales, con diversos componentes agrícolas, pecuarios y forestales. Para lograr este propósito se requiere aplicar esquemas participativos que involucren al productor y generar y difundir información de apoyo a la toma de decisiones a escala micro, que ayude a romper esquemas y tradiciones.

Palabras claves: suelos, degradación, capa arable, altillanura, Colombia

Introducción

La pérdida de recursos de suelos debido a su degradación es un tema importante a escala global, por sus efectos negativos sobre la productividad y la competitividad agrícola, el medio

ambiente y la seguridad alimentaria. Se trata de un tema de mayor relevancia para los países en desarrollo, ya que su crecimiento poblacional ejerce cada vez mayor presión sobre los recursos de tierra y los recursos naturales en general.

La degradación de los suelos es un problema que, a largo plazo, afecta significativamente la base de recursos naturales, la capacidad de producir alimentos y la seguridad alimentaria en el planeta, en particular de los grupos poblacionales de menores recursos económicos.

La evaluación global del deterioro de los recursos de tierras, inducido por la actividad humana, muestra que el 15% del área disponible ha sufrido reducciones en su capacidad productiva. De ese total, el 13% confronta problemas de degradación en el rango de ligera a moderada, y en el 2% restante, la gravedad del problema se cataloga como severa o muy severa (Figura 1) (ISRIC-UNEP-FAO, 1996).

De otra parte, el estudio GLASOD (*Global Land Assessment of Soil Degradation*) estima que en el planeta, de un total de 8.7 billones de hectáreas de tierras con potencial agrícola, aproximadamente 2 billones (23%) están degradadas. El 3.5% (0.3 billones) presenta un daño tan severo, que solo puede revertirse con fuertes inversiones en obras de ingeniería. El 10% (0.9 billones) presenta moderada degradación, reversible mediante inversiones significativas en el ámbito de las unidades de producción y el 9% restante (0.8 billones) ha sufrido degradación leve, que se puede corregir mediante cambios en las prácticas de manejo y uso del suelo.

El resultado final del deterioro de los suelos es la caída de los rendimientos, que en casos extremos resulta en la pérdida definitiva de la tierra como factor de producción. En muchas oportunidades, los efectos de la degradación tan solo se aprecian a largo plazo, ya que la incorporación progresiva de más insumos (fertilizantes, correctivos, etc.) disimula temporalmente los efectos negativos, manteniendo el nivel de rendimientos, pero incrementando los costos de producción.

Si bien se encuentran áreas degradadas en todos los continentes, los impactos económicos negativos de mayor magnitud aparecen en los países que dependen, en mayor medida, de la agricultura como fuente de ingresos y de empleo.

La creciente expansión de la población, particularmente en los países más pobres, ejerce una gran presión sobre los recursos de tierras. Aproximadamente, 5.5 billones de personas en la actualidad utilizan el 10% del área de la tierra, para desarrollar cultivos y actividades ganaderas (Erosion and Soil Degradation, 2004).

En Colombia, la Orinoquia es una vasta reserva de recursos de tierras, energéticos mineros, agrícolas, pecuarios y de biodiversidad, de importancia estratégica para el desarrollo del país en las próximas décadas. Este enorme territorio cuenta con aproximadamente 26 millones de hectáreas, de las cuales más de la mitad (53%) corresponde a altillanura bien drenada, en tanto que una quinta parte es altillanura mal drenada (Mejía, 1984). Estos recursos

de tierra son muy frágiles, dada su alta susceptibilidad a la degradación física, química y biológica, tan pronto se establecen en ellos cultivos comerciales. Los especialistas en el tema han encontrado que la labranza con rastra de discos está causando altos niveles de compactación en los primeros 10–20 cm de profundidad.

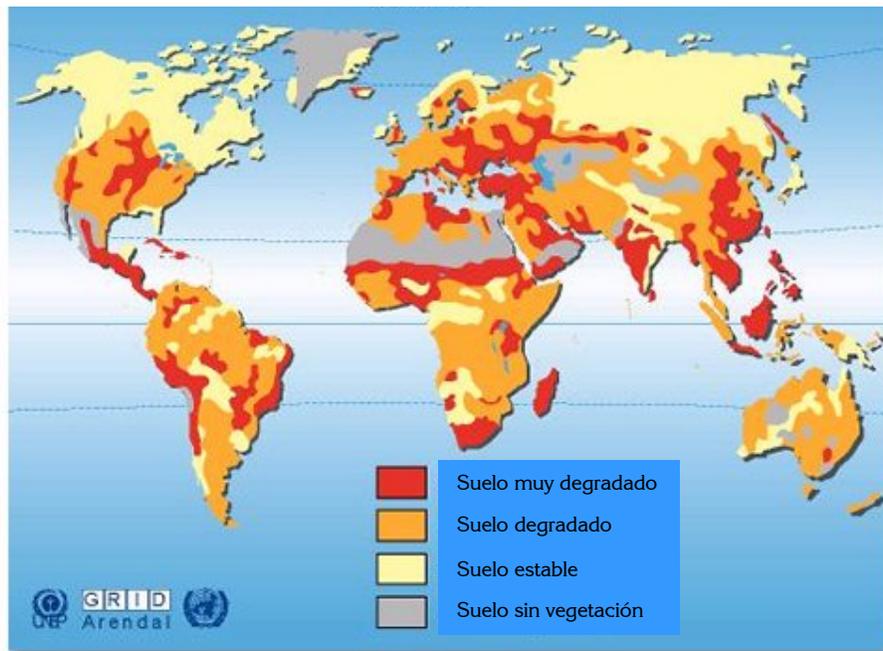


Figura 1. Degradación de suelos a escala global: Un problema sin fronteras.

FUENTE: GRID-Arendal (1997).

El uso de implementos inapropiados, asociado con la intensa precipitación típica de la región, deriva en severos daños de la estructura física del suelo, que conducen al sellamiento de la capa superficial y la consecuente reducción drástica de las tasas de infiltración, flujo de aire y agua, afectando la disponibilidad de nutrientes, de por sí bajos en estos suelos.

En condiciones naturales, los suelos de sabana en el trópico colombiano no ofrecen un medio apropiado para el desarrollo agrícola sostenible. En este ambiente, el monocultivo continuo presenta un pobre desempeño, debido al rápido deterioro de sus rendimientos, como resultado de la alta susceptibilidad a la degradación de los suelos, agravada, como ya se anotó, por el uso de maquinaria inadecuada (Amézquita et al., 2000b).

Las particularidades de los suelos de la altillanura han sido estudiadas por un amplio grupo de investigadores (entre otros, Rippstein, 1993; Spain, 1993; Almanza y Argüelles, 1998; Amézquita, 1998, Amézquita et al., 1999, 2004; Aristizábal y Baquero, 1999; Phiri et al., 2003),

quienes en general los catalogan como poco fértiles y muy propensos a la erosión y a la degradación estructural.

No obstante la alta probabilidad de degradación de los suelos de la altillanura, estos problemas pueden ser prevenidos, controlados y/o revertidos, mediante diversas estrategias de manejo y uso de los mismos.

Entre 1994 y 1999, dada la precaria sostenibilidad de los suelos de la altillanura, se enfatizó en los estudios sobre física, química y microbiología, que dieron lugar a un diagnóstico más preciso de los suelos de sabana nativa, bajo múltiples usos. Esto derivó en el desarrollo de indicadores de degradación en términos físicos, químicos y biológicos. A partir de 1999 y hasta 2003, con base en los indicadores anteriores y a través de diferentes proyectos interinstitucionales, con la participación del Departamento Administrativo de Ciencia, Tecnología e Innovación (Colciencias), la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (Corpoica), el Programa Nacional de Transferencia de Tecnología Agropecuaria (PRONATTA), el Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural (MADR) y la Universidad de los Llanos (Unillanos) se diseñaron las estrategias para la construcción y mantenimiento de las capas arables, de acuerdo con metas preestablecidas de mejoramiento del suelo, en función de los requerimientos de los sistemas de producción a implementar (Hoyos et al., 1999; Amézquita et al., 2004).

La formación de la capa arable incluye el mejoramiento físico del suelo mediante la labranza vertical con cinceles, la aplicación de enmiendas de fertilización para mejorar sus condiciones químicas y la siembra de material vegetal, adaptado a condiciones de acidez y baja fertilidad, para impulsar la actividad biológica. El desarrollo de germoplasma mejorado de pastos y de cultivos, actualmente disponible y con los atributos señalados, es el resultado del trabajo conjunto del CIAT, Corpoica y el Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo (CIMMYT) en la altillanura colombiana.

La viabilidad económica a escala de finca de las nuevas alternativas de recuperación, mantenimiento y uso del suelo, depende de sus costos y de los niveles de productividad que se alcancen.

El propósito de este documento es evaluar la conveniencia económica en el contexto micro, de la adopción de las nuevas metodologías de formación de la capa arable en esta región colombiana, resultantes del trabajo del Convenio MADR-CIAT y de las instituciones nacionales colaboradoras.

El estudio evalúa tres alternativas técnicas para la construcción de la capa arable, que implican diferentes secuencias de los componentes de pastos y de cultivos, en la construcción de la misma.

- *Alternativa 1:* Se estructura de la siguiente forma:
 1. Siembra y establecimiento durante un año de una pastura mejorada.
 2. Ceba de novillos durante un lapso de 2 a 3 años, aplicando fertilización de mantenimiento.
 3. Rotación de cultivos semestrales, arroz y soya, durante un año. Transcurridos 4 a 5 años, la capa arable queda construida.

- *Alternativa 2:* Incluye:
 1. Establecimiento de una pastura asociada (pasto + arroz), la cual al cabo de un año está lista para el pastoreo.
 2. Ceba de novillos durante un lapso de 2 a 3 años, efectuando rotación de praderas y fertilización de mantenimiento.
 3. Siembra rotacional de cultivos: maíz en el primer semestre y soya en el segundo. En el lapso de 4–5 años, la capa arable está disponible.

- *Alternativa 3:* Presenta la siguiente secuencia:
 1. Rotación durante un período de 2 a 3 años de cultivos semestrales, iniciando con maíz y terminando con soya.
 2. Establecimiento, durante el tercer o cuarto año, de una pastura asociada con maíz, la cual al año puede ser pastoreada. Esta alternativa implica que la capa arable queda construida al tercer o cuarto año.

Dado que algunos productores de la altillanura han comenzado a utilizar prácticas conservacionistas de uso del suelo, el estudio incluye un sondeo rápido efectuado en fincas de la zona de Puerto López-Puerto Gaitán, en el departamento del Meta, para identificar y entender las principales tendencias y facetas de este incipiente proceso de cambio técnico. Este esfuerzo representa un primer paso hacia un seguimiento y evaluación más rigurosos, de los procesos de adopción tecnológica en esta parte del país.

Área geográfica de referencia: La altillanura colombiana

La altillanura colombiana se extiende desde el municipio de Puerto López, sobre la margen derecha del río Meta, hasta la desembocadura del Orinoco, estimándose que contiene un área potencial agrícola de aproximadamente 4.5 millones de hectáreas. En este territorio predomina una sabana herbácea extensa y continua, presentándose también especies leñosas, aisladas o agrupadas en bosques de galería, que bordean los cursos de agua. Sus suelos se caracterizan por la elevada acidez (pH 3.8–5.0), alto contenido de Al (frecuentemente saturación mayor del 80%), baja capacidad de intercambio catiónico y pobre fertilidad, por el bajo contenido de materia orgánica que resulta en escasa disponibilidad de nutrientes para las plantas (P, N, Ca, Mg y K).

La actividad económica predominante en la región es la ganadería extensiva de cría y levante de vacunos. La producción de cultivos presenta limitaciones originadas principalmente por la pobreza de los suelos y la saturación de Al. Los problemas de infraestructura vial y de servicios de apoyo a la producción constituyen serios cuellos de botella para la producción agrícola en la altillanura. Sin embargo, esta región por sus ventajas comparativas, es estratégica para la expansión de la frontera agrícola nacional, encaminada a incrementar y diversificar la producción de alimentos y materias primas, en un país con alta dinámica demográfica y amplios sectores de la población marginados y con graves carencias alimentarias.

Los sistemas de producción tradicionales son extensivos, con énfasis en la ganadería vacuna. En la medida en que nuevas opciones de producción aparecen en la región, en particular germoplasma mejorado de pastos y de cultivos, adaptado a las condiciones edáficas y climáticas de la zona, los sistemas de producción tienden a intensificarse y a diversificarse. Un estudio de Cadavid (1995) documenta que la introducción progresiva de pastos mejorados, particularmente del género *Brachiaria*, en las fincas ganaderas de la altillanura fue muy dinámica en el período entre 1986–1997. En dicho lapso, en el área de los municipios de Puerto López y Puerto Carreño, la superficie en pastos mejorados creció más del doble, pasando de 89 mil a 173 mil hectáreas. Se destaca la aparición de nuevos materiales de *Brachiaria*: *B. humidicola*, *B. brizantha*, *B. dictyoneura*, sembradas como monocultivo o asociadas con leguminosas tales como *S. capitata*, *D. ovalifolium* y *A. pintoii* (Cadavid, 1995). Una estimación hacia el 2000, basada en las cifras reportadas por Cadavid, señala que el área total en pasturas en la zona es aproximadamente 1.1 millones de hectáreas, de las cuales el 22% corresponde a pasturas mejoradas (Rivas, 2002).

Tradicionalmente, la agricultura se ha desarrollado en las vegas de los ríos, estimándose que las áreas agrícolas no superan las 20 mil hectáreas, casi la mitad de ellas dedicadas al cultivo del arroz y el resto a maíz, yuca, plátano, cítricos y palma aceitera. La escasa disponibilidad de germoplasma de cultivos, adaptado a las condiciones particulares de la altillanura, ha sido una de las principales causas que explican el lento avance de la agricultura en esta zona de Colombia. Los nuevos desarrollos técnicos que implican la ampliación de la oferta de germoplasma de pastos y de cultivos adaptado y los novedosos enfoques integrales de producción que integran el germoplasma mejorado con nuevas prácticas de manejo y uso de los recursos de suelos, abren una perspectiva muy promisoriosa para el despegue de la actividad agropecuaria en la altillanura.

La distribución de la tierra en el municipio de Puerto López (Meta) sirve para ilustrar el tema de la tenencia de la tierra en el área objetivo. El Cuadro 1 muestra que hay un número significativo de explotaciones agropecuarias menores de 50 ha (56% del total), que controlan una fracción muy baja de la tierra total disponible (6%). Un poco más de la mitad del área total se ubica en las fincas del rango 200–500 ha, que agrupa el 23% del total de fincas. Lo anterior evidencia un alto grado de concentración de la tierra, tal como se observa en la Figura 2, que muestra la curva de Lorenz.

Cuadro 1. Distribución de la tierra en Puerto López (departamento del Meta).

Estrato de tamaño (ha)	Área (ha)		No. de fincas	
	Total	% del total	Total	% del total
3 <	25,125	3.6	740	33.1
3 > 50	16,892	2.4	502	22.5
50 > 200	57,469	8.3	370	16.6
200 > 500	109,702	15.8	278	12.4
500 > 1000	242,539	35.0	240	10.7
1000 > 2000	101,488	14.6	62	2.8
2000 >	139,537	20.1	41	1.8
Total	692,752	100.0	2233	100.0

FUENTE: IGAC (2000).

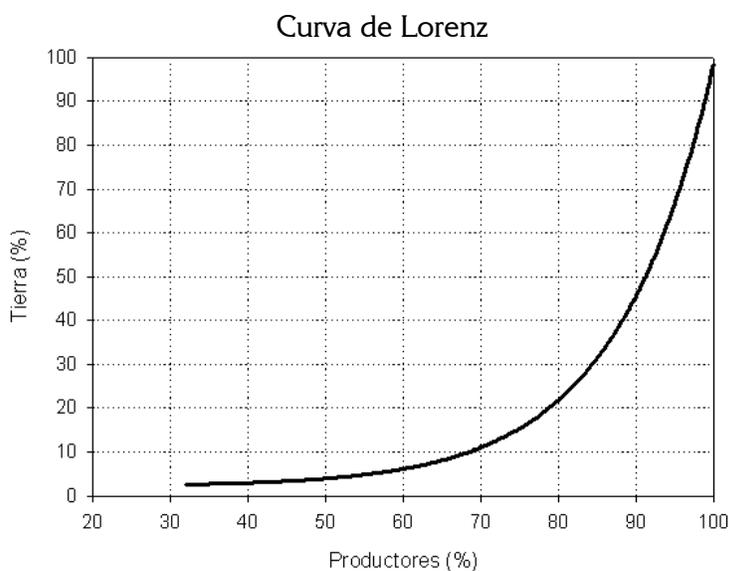


Figura 2. Concentración de la propiedad de la tierra en Puerto López (departamento del Meta).

Se espera que los nuevos esquemas de producción que mejoran la calidad del suelo e incrementan su productividad, como es el caso de la construcción de la capa arable, tengan un impacto significativo sobre el grupo de pequeños y medianos productores, con fincas menores de 50 ha, que poseen limitadas cantidades de tierra y que constituyen un poco más de la mitad del total de productores. Las nuevas alternativas tecnológicas permitirían diversificar la producción, reducir los riesgos económicos y biológicos y aumentar los ingresos, haciendo más viables, rentables y sostenibles las explotaciones de pequeña escala.

El impacto potencial de las tecnologías de conservación de suelos en la región de interés tiene diferentes implicaciones según la escala de los productores. Para los de pequeña escala, que son numerosos pero que controlan una pequeña fracción de la tierra total disponible, el mayor impacto se genera a través de la equidad, al mejorar sus ingresos y el nivel de vida. En el caso de los agricultores de gran escala, que son pocos y controlan la mayor parte de la tierra disponible, los beneficios esperados se originan principalmente en la conservación del recurso suelo y la generación de empleo, ingresos y producción, que impulsan el crecimiento económico general.

Construcción de la capa arable

Desde hace varios años, con el apoyo del Ministerio de Agricultura de Colombia y dentro del marco del Convenio de Cooperación Técnica y Científica MADR-CIAT, se viene trabajando en el desarrollo de nuevas tecnologías de manejo y uso de los suelos de la altillanura, para establecer modernos sistemas de producción eficientes y sostenibles.

Las nuevas tecnologías propuestas giran alrededor del concepto de “construcción y mantenimiento de una capa arable” en esos suelos pobres, para posteriormente establecer sistemas de pastos y de cultivos, de alta productividad sostenibles en el tiempo. Ésta se define como una capa de suelo, en la cual las limitaciones físicas, químicas y biológicas sean mínimas (Amézquita et al., 2000a, 2000b, 2001, 2004).

La idea central es transformar suelos de baja productividad en recursos altamente productivos, mediante prácticas planificadas de mejoramiento físico, químico y biológico (Figura 3). Las condiciones físicas del suelo se mejoran mediante la labranza vertical con cinceles rígidos a profundidades no mayores a 30 cm, lo cual permite fraccionar el suelo y superar limitaciones físicas como alta densidad aparente, sellamiento superficial, tasas de infiltración bajas y dificultades para la penetración de las raíces de los pastos y de los cultivos (Amézquita, 1998; Amézquita et al., 2000b).

Se efectúan enmiendas químicas al suelo (cal + fertilizantes) para incrementar su fertilidad y reducir los problemas de acidez. El uso de material vegetal, gramíneas y leguminosas forrajeras, genéticamente adaptado a elevada acidez y baja fertilidad, capaz de producir sistemas de raíces extensos, fuertes y fibrosos, apunta a incrementar la actividad biológica y a mejorar la cantidad y calidad de la materia orgánica.

La tecnología de capa arable es un enfoque holístico para enfrentar la problemática de los suelos de la altillanura. En el pasado reciente, las soluciones propuestas se enfocaban exclusivamente a superar los problemas físicos y/o químicos. Las nuevas alternativas involucran también al germoplasma, como mecanismo para el mejoramiento y la conservación de los suelos.

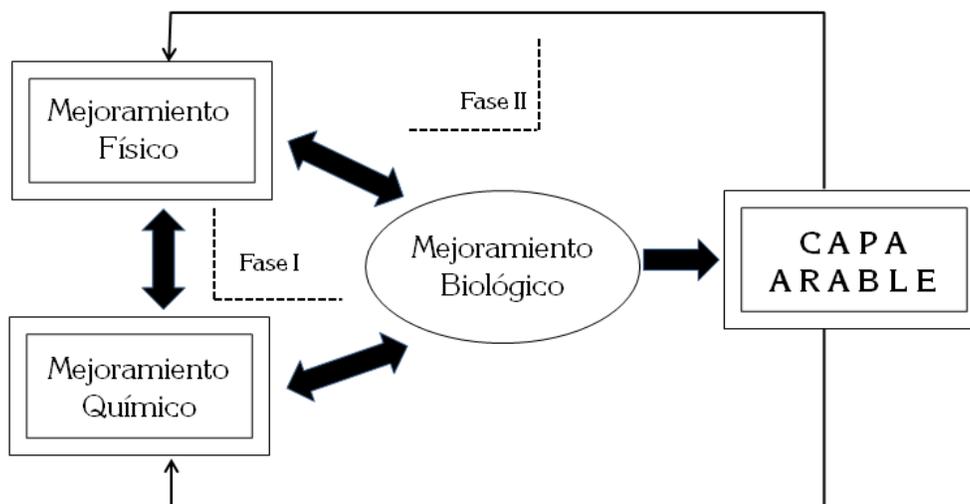


Figura 3. Fases del proceso de construcción de la capa arable.

FUENTE: CIAT-Colciencias-Corpoica (1998).

Los científicos que trabajan en el tema plantean que la formación y mantenimiento de la capa arable es un proceso con una secuencia claramente definida en el tiempo. En su fase inicial, el trabajo de formación se orienta a la preparación y enmienda del suelo, de tal manera que mejore su aptitud para el crecimiento de los pastos y de los cultivos.

Una vez agotada esta fase se establecen los cultivos cuyas raíces se desarrollan y sus hojas caen, lo cual es beneficioso para el suelo. En la medida en que se repiten los ciclos de cultivos y pastos, se observa un mejoramiento progresivo del suelo, que permite el establecimiento gradual de germoplasma con mayores requerimientos nutricionales y más productivos. Lo anterior resulta en una espiral ascendente de interacción de factores bióticos y abióticos, que conduce finalmente a la obtención de la capa arable con condiciones físicas, químicas y biológicas, que permite el desarrollo de una agricultura sostenible y eficiente (CIAT-Colciencias-Corpoica, 1998).

Información utilizada

Los datos para la evaluación económica de tres alternativas para la construcción de la capa arable en la altillanura oriental, fueron suministrados por los técnicos del Proyecto de Suelos del CIAT, quienes basándose en experiencias de campo aportaron la información sobre las inversiones, gastos y rendimientos de cultivos, involucrada en cada una de las alternativas consideradas. La Figura 4 ilustra las secuencias de pastos-cultivos de las alternativas consideradas.

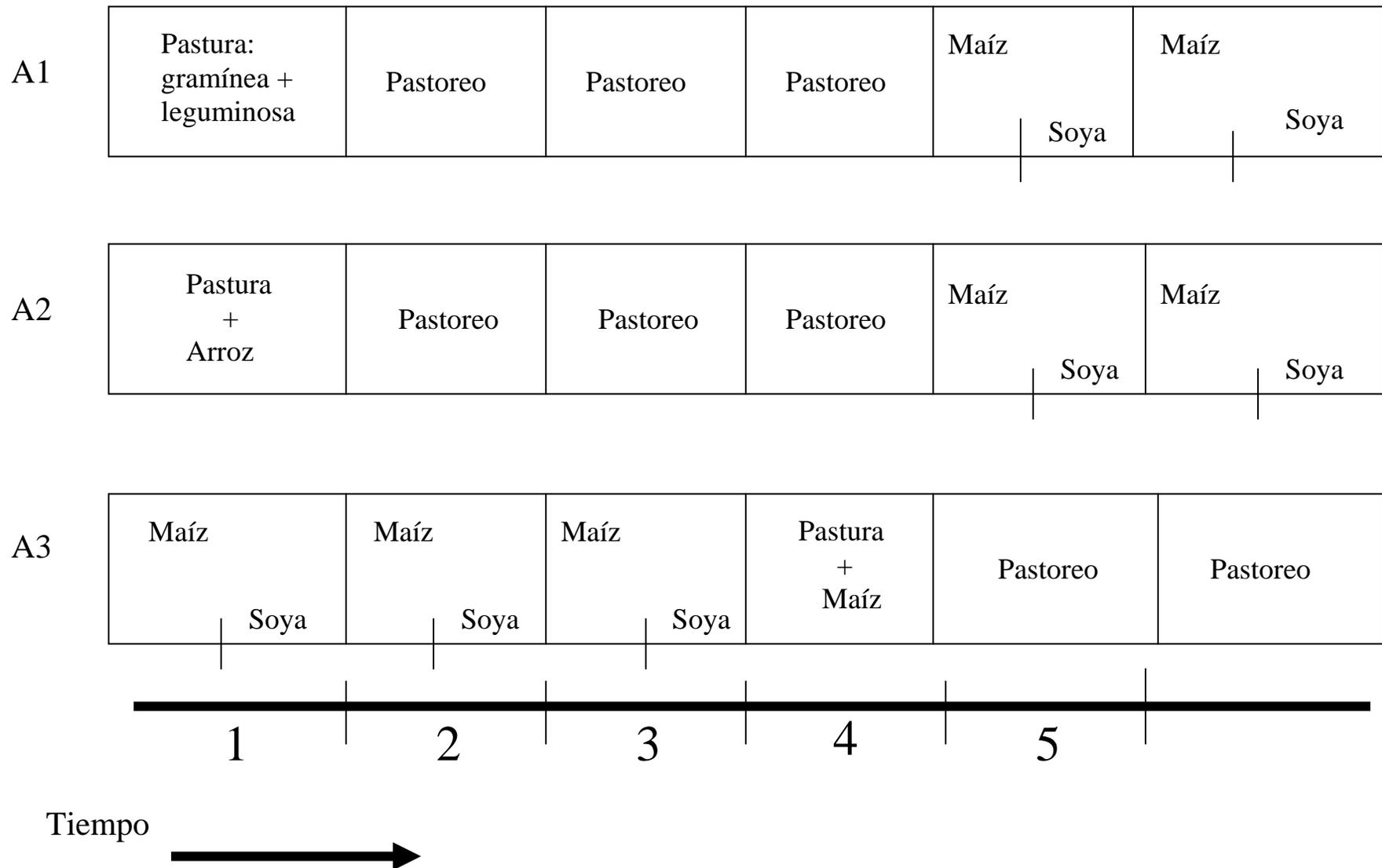


Figura 4. Secuencias de rotaciones de tres alternativas de construcción de la capa arable en la altillanura colombiana.

La *alternativa 1* se inicia con el establecimiento de una pradera mixta, una gramínea mezclada con una leguminosa, la cual está lista para su utilización al cabo de un año. Luego de pastorearla, se establece un sistema de rotaciones semestrales de cultivos; en este caso, maíz y soya. La información de costos se expresa en pesos colombianos del año 2002. La inversión inicial de establecimiento de la pastura asociada (gramínea + leguminosa) supera ligeramente el millón de pesos por hectárea (Cuadro 2). Los costos directos (fertilización, semilla, maquinaria y mano de obra) representan el 65% de la inversión inicial.

Los de mayor relevancia son los de fertilización al establecimiento, casi 30% del costo total, y el de maquinaria para la preparación del suelo, 17% (Figura 5).

Cuadro 2. Costo de establecimiento de una pastura mixta, gramínea + leguminosa en la altillanura oriental de Colombia ('000 \$ de 2002/ha).

Costo establecimiento	Unidad	Cantidad	Valor unitario (\$)	Costo total ('000 \$/ha)
Fertilización establecimiento	kilos			318.8
Cal dolomita		1000	105	105.0
Roca fosfórica		500	163	81.5
Clorato de potasio		100	500	50.0
Sulpomag		100	400	40.0
Úrea		50	500	25.0
Sulfato de zinc		10	1,726	17.3
Fertilización mantenimiento	kilos			77.3
Cloruro de potasio		120	500	60.0
Sulfato de zinc		10	1,726	17.3
Semilla	kilos			120.0
Gramínea		4	15,000	60.0
Leguminosa		4	15,000	60.0
Maquinaria	pases			180.0
Encalada (cal + roca)		1	15,000	15.0
Arado de cinceles (a 20 cm)		2	30,000	60.0
Rastra de discos		1	20,000	20.0
Sembradora – abonadora		1	30,000	30.0
Abonadas (1 ^{ro} , 2 ^{do} y 3 ^{er} año)		3	5,000	15.0
Escardillos (2 ^{do} y 3 ^{er} año)		1	20,000	20.0
Total costos directos				696.0
Imprevistos	%	10		70.0
Arrendamiento	año	3	84,000	252.0
Asistencia técnica	año	3	15,000	45.0
Total costos indirectos				367.0
Costo total				1063

FUENTE: CIAT (2000).

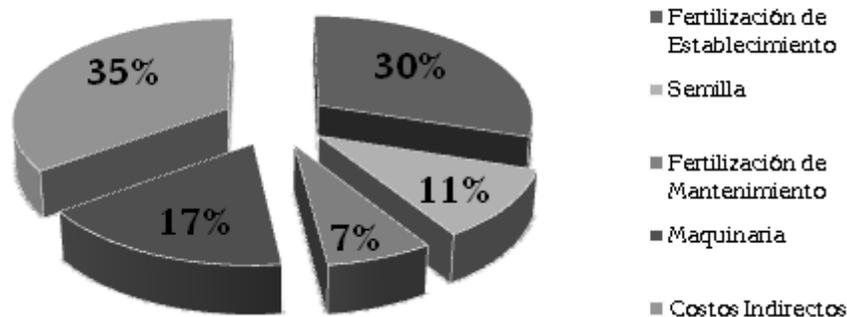


Figura 5. Estructura del costo de establecimiento de una pastura mejorada (gramínea + leguminosa) para iniciar la formación de la capa arable en la altillanura.

El Cuadro 3 presenta los costos de siembra de la rotación maíz-soya. El costo de establecimiento del maíz en el primer semestre casi duplica al de la soya del segundo semestre. Esto obedece a que el último cultivo aprovecha la fertilización residual del maíz, por lo cual sus costos de fertilización se reducen sustancialmente. En otras palabras, algunos costos efectuados en el primer semestre benefician al cultivo del segundo. Aunque el margen bruto por hectárea para soya resulta significativamente mayor que el del maíz, la evaluación económica de los componentes individuales no tiene mayor sentido, dadas las interacciones existentes entre ellos, lo que obliga a la evaluación económica del sistema de producción en su conjunto.

En la *alternativa 2*, la construcción de la capa arable se inicia con el establecimiento de una pastura mixta, conformada por una gramínea y una leguminosa, asociada con arroz. Después de efectuar el pastoreo, se establece la rotación semestral de cultivos.

El costo de establecimiento de la asociación pastura-cultivo supera ampliamente al de la pradera sola. Este efecto negativo es contrarrestado por el hecho de que, al finalizar el primer semestre, se reciben los ingresos por la venta de arroz. En el presente caso, esos recursos monetarios financian totalmente el costo inicial de establecimiento (Cuadro 4). Los rendimientos de arroz, 4.0 t/ha, están casi al nivel del rendimiento de equilibrio, 3.9 t, cantidad de arroz por hectárea que es necesaria producir para cubrir totalmente el costo del establecimiento de la asociación pastura + arroz. Los costos de instalación de la rotación maíz-soya de la segunda alternativa son exactamente iguales a los de la primera y corresponden a los que se presentan en el Cuadro 3.

Cuadro 3. Costo de establecimiento de la rotación maíz-soya para formación de la capa arable en la altillanura oriental de Colombia ('000 \$ de 2002/ha).

Costo	Costo ('000 \$/ha)	
	Semestre A: Maíz	Semestre B: Soya
Costos directos	1407.0	743.6
Abonos	703.8	296.9
Cal dolomita	262.5	
Sulcamag	70.0	70.0
DAP	120.0	120.0
Cloruro de potasio	100.0	50.0
Úrea	100.0	
Zinfosol (zinc + boro)	51.3	51.3
Molibdato		5.6
Herbicidas	30.0	30.0
Glifosato	30.0	30.0
Maquinaria y transporte	512.5	240.0
Aplicación de herbicidas	15.0	15.0
Encalada	15.0	
Arado de cinceles (30 cm)	80.0	
Rastra de discos	20.0	
Sembradora-abonadora	50.0	50.0
Abonadas	30.0	
Recolección de cosecha	100.0	100.0
Transporte cosecha	135.0	75.0
Secado de grano	67.5	
Semilla	114.5	104.0
Otros insumos	46.2	72.7
Trichogramma	20.0	30.0
Telenomus	22.5	22.5
Lorsban	3.7	3.7
Inóculo		16.5
Costos indirectos	249.0	100.0
Imprevistos	140.0	75.0
Arrendamiento (anual)	84.0	
Asistencia técnica	25.0	25.0
Costo total	1656.0	843.6
Rendimiento (t/ha)	4.5	2.5
Costo/t	368.0	337.4
Precio al productor ('000 \$/t)	430.0	785.0
Margen bruto ('000 \$/t)	62.0	447.6

FUENTE: CIAT (2000).

Cuadro 4. Costo de establecimiento de una pastura asociada gramínea + leguminosa + arroz en la altillanura ('000 \$ de 2002/ha).

Costo establecimiento	Unidad	Cantidad	Valor unitario (\$)	Costo total ('000 \$/ha)
Fertilización establecimiento	kilos			546.3
Cal dolomita		1000	105	105.0
Sulcamag		200	350	70.0
DAP		200	600	120.0
Cloruro de potasio		200	500	100.0
Urea		200	500	100.0
Zinfosil (zinc + boro)		20	2,564	51.3
Fertilización mantenimiento	kilos			77.3
Cloruro de potasio		120	500	60.0
Sulfato de zinc		10	1,726	17.3
Semilla	kilos			240.0
Gramínea		4	15,000	60.0
Leguminosa		4	15,000	60.0
Arroz		100	1,200	120.0
Maquinaria y transporte	pases/ha			445.0
Encalada		1	15,000	15.0
Arado de cinceles (a 20 cm)		2	40,000	80.0
Rastra de discos		1	20,000	20.0
Sembradora-abonadora		1	50,000	50.0
Abonadas arroz		2	15,000	30.0
Abonadas (2 ^{do} y 3 ^{er} año)		2	5,000	10.0
Escardillos (2 ^{do} y 3 ^{er} año)		2	20,000	40.0
Recolección	kilos	4000	20	80.0
Transporte cosecha	kilos	4000	30	120.0
Otros insumos				23.7
Tichogramma	pulgadas	200	200	20.0
Lorsban	kilos	1	3,700	3.7
Total costos directos				1332.3
Imprevistos	%	10		133.0
Arrendamiento	año	3	84,000	252.0
Asistencia técnica:				70.0
Arroz	año	1	25,000	25.0
Pastos	año	3	15,000	45.0
Total costos indirectos				455.0
Costo total				1787.3
Rendimiento arroz (t/ha)			4.0	
Precio de arroz al productor ('000 \$/t)			464.0	
Ingreso por venta de arroz ('000 \$/t)			1856.0	
Rendimiento de equilibrio (t/ha)			3.9	
Precio de equilibrio ('000 \$/t)			458.3	

FUENTE: CIAT (2000).

En la *alternativa 3*, el proceso de formación de la capa arable comienza con un sistema rotacional de cultivos semestrales (maíz-soya) por un lapso de 2 a 3 años, luego del cual se establece una pastura mixta asociada con un cultivo; en este caso, maíz.

Las rotaciones de cultivos, previas a la siembra de la pastura, ayudan a reducir sus costos de fertilización de establecimiento. Nuevamente, al asociar la pastura con un cultivo (maíz), se obtienen ingresos que permiten financiar el costo total de instalación de la asociación.

Para obtener un equilibrio de ingresos y de costos, dado un precio de \$430 mil por tonelada, se requiere lograr un rendimiento de maíz no inferior a 3.5 t/ha. Por otro lado, dado un rendimiento de 4.5 /ha, obtenido a escala comercial, el precio recibido por el productor no puede bajar de \$333 mil por tonelada, para poder cubrir totalmente el costo de establecimiento, con los ingresos por la venta del maíz (Cuadro 5).

Metodología

La formación de capa arable es un proceso de mejoramiento gradual de un factor de producción como lo es el suelo, que finalmente conduce a incrementar su capacidad productiva. Desde el punto de vista de la teoría económica, el precio o remuneración a un factor de producción está en relación directa con su productividad, por lo cual se espera que una vez efectuadas las inversiones para la formación de la capa arable, el precio o el arrendamiento de la tierra se incrementen, dada su mayor productividad.

Partiendo de esta base, la evaluación económica a nivel micro se plantea como un análisis de las inversiones que un productor privado debe efectuar a través del tiempo, para construir la capa arable. Para conocer la bondad y conveniencia económica de tales inversiones, se estiman dos indicadores de rentabilidad: tasa interna de retorno (TIR) y valor presente neto (VPN).

A partir de la información básica de costos de establecimiento de pasturas y de cultivos, se simulan, a través de un ciclo de 10 años, las distintas secuencias productivas involucradas en cada alternativa evaluada (Cuadro 6).

Para la evaluación del componente ganadero se asume que las pasturas mejoradas se utilizan en actividades de ceba, en donde el productor compra animales flacos de 300 kg y los vende para matadero con un peso de 400 kg al cabo de un año.

Se supone que estas praderas soportan una carga promedio de 1.5 animales por hectárea, a través del período de evaluación.

Cuadro 5. Costo de establecimiento de una pastura asociada gramínea + leguminosa + maíz en la altillanura ('000 \$ de 2002/ha)^a.

Costo establecimiento	Unidad	Cantidad	Valor unitario (\$)	Costo total ('000 \$/ha)
Fertilización establecimiento	kilos			441.3
Sulcamag		200	350	70.0
DAP		200	600	120.0
Cloruro de potasio		200	500	100.0
Urea		200	500	100.0
Zinfosil		20	2,564	51.3
Semilla	kilos			234.5
Gramínea		4	15,000	60.0
Leguminosa		4	15,000	60.0
Maíz		20	5,726	114.5
Maquinaria	pases/ha			512.5
Aplicación herbicidas		1	15,000	15.0
Encalada		1	15,000	15.0
Arado de cinceles (a 20 cm)		2	40,000	80.0
Rastra de discos		1	20,000	20.0
Sembradora-abonadora		1	50,000	50.0
Abonadas		2	15,000	30.0
Recolección cosecha		1	100,000	100.0
Transporte cosecha		4500	30	135.0
Secado de grano		4500	15	67.5
Otros insumos	kilos			46.2
Trichogramma		100	200	20.0
Telenomus	sobres	25	900	22.5
Lorsban	kilos	1	3,700	3.7
Total costos directos				1264.5
Imprevistos	%	10		126.0
Arrendamiento	año	1	84,000	84.0
Asistencia técnica	año	1	25,000	25.0
Total costos indirectos				235.0
Costo total				1499.5
Rendimiento maíz (t/ha)			4.5	
Precio maíz al productor ('000 \$/t)			430	
Ingreso por venta de maíz			1935	
Rendimiento de equilibrio (t/ha)			3.5	
Precio de equilibrio ('000 \$/t)			333	

a. Establecimiento previa una rotación semestral maíz-soya, durante un lapso de 2 a 3 años.

FUENTE: CIAT (2000).

Cuadro 6. Secuencia de actividades productivas para evaluar la rentabilidad de las inversiones para construir la capa arable.

Año	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3
0	Establecimiento de la pastura sola	Establecimiento de la pastura + arroz	Maíz Soya
1	Pastoreo	Pastoreo	Maíz Soya
2	Pastoreo	Pastoreo	Maíz Soya
3	Pastoreo	Pastoreo	Establecimiento de la pastura + maíz
4	Maíz Soya	Maíz Soya	Pastoreo
5	Maíz Soya	Maíz Soya	Pastoreo
6	Establecimiento de la pastura + maíz	Maíz Soya	Pastoreo
7	Pastoreo	Establecimiento de la pastura + arroz	Pastoreo
8	Pastoreo	Pastoreo	Pastoreo
9	Pastoreo	Pastoreo	Pastoreo

El costo anual de manejo, drogas, sales, etc., de la producción ganadera se estima como una proporción del precio inicial de compra del ganado flaco, siguiendo la metodología usada por Rivas et al. (1990).

Para cada alternativa se construye un flujo de inversiones, costos e ingresos, sobre el que se calculan los indicadores de rentabilidad de los recursos invertidos en la construcción de la capa arable.

Los flujos monetarios se expresan en pesos constantes del 2002. Los precios de los insumos se ajustaron por el costo de transporte hasta la altillanura, a una distancia de 150 km de Villavicencio, el principal centro económico de la región.

El Cuadro 7 resume los principales supuestos económicos y técnicos empleados. En cuanto a estos últimos, cabe anotar que sus niveles se fijaron por debajo de los observados a escala experimental y aún de finca, con el propósito de evitar la sobrestimación de los beneficios económicos.

Cuadro 7. Parámetros económicos y técnicos usados en la evaluación.

Parámetros	Nivel
Precio de cultivos: ('000 \$/t)	
Arroz	464
Maíz	438
Soya	785
Precios de ganado (\$/kg en pie) ^a	
Novillo flaco	2120
Novillo cebado	2486
Rendimiento de los cultivos (t/ha)	
Arroz	4.0
Maíz	4.0
Soya	2.0
Carga animal promedio (UA/ha)	1.5
Ganancia de peso (g/día)	274
Tasa de interés real de descuento (% semestral)	8
Horizonte de evaluación (años)	10

a. Valores promedios en el mercado de Bogotá (Fedegan, 2003).

Resultados

Rentabilidad y viabilidad

La evaluación muestra que las tres opciones consideradas de formación de capa arable en la altillanura son atractivas desde el punto de vista económico, dado que el valor presente neto en todas ellas es positivo y las tasas internas de retorno resultan superiores a la tasa de interés real de oportunidad (aproximadamente 16% anual) (Cuadro 8). Las tres alternativas se evalúan para un horizonte de 10 años, y la secuencia de sus actividades productivas se muestra en el Cuadro 6. Se aprecian diferencias económicas importantes entre ellas. La alternativa 1 presenta los menores índices de rentabilidad, siendo superada ampliamente por las opciones 2 y 3 (Cuadro 8).

Cuadro 8. Indicadores de rentabilidad de tres alternativas técnicas para la construcción de la capa arable en la altillanura oriental de Colombia.

Alternativa	Indicadores de rentabilidad	
	Valor presente neto ('000 \$/ha)	Tasa interna de retorno (%)
1	295	19.9
2	1330	37.4
3	1716	57.4

La *alternativa 1* se inicia con el establecimiento de una pastura mixta de gramínea y leguminosa, pero sin incluir un cultivo. Al comenzar el sexto año, previos tres ciclos de pastoreo de novillos en engorde y 2 años de rotaciones de cultivos semestrales, se establece nuevamente una pastura mixta, pero ya asociada con un cultivo de maíz. Una vez establecida la pastura, se efectúan 3 años continuos de pastoreo de novillos para ceba. La TIR resultante es de 19.9% anual. Al analizar esta alternativa, se puede apreciar la importancia de los cultivos como generadores de rentabilidad al sistema de producción en conjunto. Si la pastura plantada en el año 6 no incluyera un cultivo, la TIR se reduciría a 14.3% (Cuadros 8 y 9).

La importancia crítica de los cultivos, en términos de rentabilidad, se evidencia una vez más al evaluar la *alternativa 2*, que es muy similar a la 1, pero que incluye el establecimiento de pasturas mixtas con un cultivo asociado y en el cual se elimina un ciclo de pastoreo de un año y se lo sustituye por uno de rotación de cultivos. Esto tiene un impacto considerable sobre la rentabilidad del 19.9 a 37.4% (Cuadros 8 y 10).

La *alternativa 3*, a diferencia de las anteriores, se inicia con un ciclo de 3 años de rotaciones de cultivos semestrales, seguido del establecimiento de una pastura mixta asociada con maíz; y culmina con un largo ciclo de pastoreo que cubre cerca de 6 años. El inicio de la construcción de la capa arable con el establecimiento de rotaciones de cultivos aporta liquidez y rentabilidad al sistema; en este caso, la TIR se sitúa en 57.4% (Cuadros 8 y 11).

Sin embargo, la alternativa 3 parece ser menos viable para pequeños y medianos productores que no poseen maquinaria propia y que no disponen de los fondos adecuados para el establecimiento de los cultivos. La falta de maquinaria representa un serio obstáculo para adelantar actividades agrícolas en la región, dado que en los períodos críticos de cosecha y de siembra, quienes no tienen maquinaria propia enfrentan la posibilidad de no conseguirla, ya que en esos cortos períodos se concentra la demanda.

La implementación de bancos de maquinaria y la organización de los productores de menor escala en cooperativas, que adquieran maquinarias y presten el servicio a los afiliados, podrían ser alternativas para viabilizar la adopción de los productores que trabajan en fincas pequeñas y medianas.

Los resultados confirman el hecho de que en el establecimiento de las pasturas, la inclusión de un cultivo asociado mejora sustancialmente la viabilidad financiera y la rentabilidad económica. Este hecho ya ha sido ampliamente documentado en estudios previos sobre el tema (Botero et al., 1990; Sanint et al., 1990; Cadavid, 1995).

La opción 3 presenta la mayor liquidez. Durante los 2 primeros años muestra un flujo de ingreso neto acumulado positivo de \$ 11,000/hectárea frente a la alternativa 1 que, en el mismo período, genera un flujo de ingreso neto acumulado negativo de \$ 2 millones por hectárea.

Cuadro 9. Flujo de inversiones, ingresos y costos de la formación de la capa arable en la altillanura oriental de Colombia: Alternativa 1
(‘000 \$ de 2002/ha).

Año	Semestre	Siembra y establecimiento de la pastura	FM ^a	Compra de ganado	Siembra de cultivos		Costo total	Ventas			Ingreso bruto	Ingreso neto
					Maíz	Soya		Ganado	Maíz	Soya		
0	I	1063.0					1063.0				0	-1063.0
	II						0				0	
1	I		77.2	954.0			1031.2				0	-1031.2
	II						0				0	
2	I		77.2	954.0			1031.2	1431.6			1431.6	400.4
	II						0				0	
3	I			954.0			954.0	1431.6			1431.6	477.6
	II						0				0	
4	I				1656.0		1656.0	1431.6			1431.6	-224.4
	II						843.6				1720.0	1720.0
5	I				1656.0		1656.0			1570.0	1570.0	-86.0
	II						843.6				1720.0	1720.0
6	I	1499.5					1499.5		1720.0	1570.0	1570.0	70.5
	II						0				1720.0	1720.0
7	I		77.2	954.0			1031.2				0	-1031.2
	II						0				0	
8	I		77.2	954.0			1031.2	1431.6			1431.6	400.4
	II						0				0	
9	I		77.2	954.0			1031.2	1431.6			1431.6	400.4
	II						0				0	
10	I							1431.6			1431.6	2288.5 ^b
	II										0	0
Valor presente neto (VPN, i=8% semestral)								295.2				
Tasa interna de retorno promedio anual (TIR, %)								19.9				

a. FM = Fertilización de mantenimiento de la pastura.

b. Se supone que la pradera sembrada en el año 6 tiene una vida útil de 7 años. Asumiendo una depreciación lineal, se incluye como ingreso el valor de salvamento de la pastura en el año final de evaluación.

Cuadro 10. Flujo de inversiones, ingresos y costos de la formación de la capa arable en la altillanura oriental de Colombia: Alternativa 2 ('000 \$ de 2002/ha).

Año	Semestre	Siembra y establecimiento pastura + arroz	FM ^a	Compra de ganado	Siembra de cultivos		Costo total	Ventas				Ingreso bruto	Ingreso neto
					Maíz	Soya		Ganado	Maíz	Arroz	Soya		
0	I	1787.2					1787.2					0	-1787.2
	II												
1	I		77.3	954.0			1031.3					0	-1031.3
	II												
2	I		77.3	954.0			1031.3	1431.6				1431.6	400.3
	II												
3	I		77.3	954.0			1031.3	1431.6				1431.6	400.3
	II												
4	I				1656.0		1656.0	1431.6				1431.6	-224.4
	II												
5	I				1656.0		1656.0				1570.0	1570.0	-86.0
	II												
6	I				1656.0		1656.0				1570.0	1570.0	-86.0
	II												
7	I	1787.2					1787.2				1570.0	1570.0	-217.2
	II												
8	I		77.3	954.0			1031.3					0	-1031.3
	II												
9	I		77.3	954.0			1031.3	1431.6				1431.6	400.3
	II												
10	I							1431.6				1431.6	2757.3 ^b
Valor presente neto (VPN, i=8% semestral)								1339.4					
Tasa interna de retorno promedio anual (TIR, %)								37.4					

a. FM = Fertilización de mantenimiento de la pastura.

b. Se supone que la pradera sembrada en el año 7 tiene una vida útil de 7 años. Asumiendo una depreciación lineal, se incluye como ingreso el valor de salvamento de la pastura en el año final de la evaluación.

Cuadro 11. Flujo de inversiones, ingresos y costos de la formación de la capa arable en la altillanura oriental de Colombia: Alternativa 3 ('000 \$ de 2002/ha).

Año	Semestre	Siembra y establecimiento pastura + maíz	FM ^a	Compra de ganado	Siembra de cultivos		Costo total	Ventas			Ingreso bruto	Ingreso neto
					Maíz	Soya		Ganado	Maíz	Soya		
0	I				1656.0		1656.0				0	-1656.0
	II					843.5	843.5		1720.0		1720.0	876.5
1	I				1656.0		1656.0			1570.0	1570.0	-86.0
	II					843.5	843.5		1720.0		1720.0	876.5
2	I				1656.0		1656.0			1570.0	1570.0	-86.0
	II					843.5	843.5		1720.0		1720.0	876.5
3	I	1499.5					1499.5			1570.0	1570.0	70.5
	II						0		1720.0		1720.0	1720.0
4	I		77.2	954.0			1031.2				0	-1031.2
	II						0				0	0
5	I		77.2	954.0			1031.2	1431.6			1491.6	400.4
	II						0				0	0
6	I		77.2	954.0			1031.2	1431.6			1491.6	400.4
	II						0				0	0
7	I		77.2	954.0			1031.2	1431.6			1491.6	40.4
	II						0.0				0	0
8	I		77.2	954.0			1031.2	1431.6			1491.6	400.4
	II						0				0	0
9	I		77.2	954.0			1031.2	1431.6			1491.6	400.4
	II						0				0	0
10	I							1431.6			1491.6	1645.8 ^b
Valor presente neto (VPN, i= 8% semestral)							1716.0					
Tasa interna de retorno (TIR, %)							57.4					

a. FM = Fertilización de mantenimiento de la pastura.

b. Se supone que la pradera sembrada en el año 3 tiene una vida útil de 7 años. Asumiendo una depreciación lineal, se incluye como ingreso el valor de salvamento de la pastura en el año final de la evaluación.

En términos de rentabilidad, la mejor secuencia de actividades para construir la capa arable en la altillanura sería iniciar con una serie de rotaciones de cultivos semestrales de aproximadamente 3 años, al cabo de los cuales se establece la pradera mixta de gramínea y leguminosa, la cual se pastorea en ceba de novillos por un período de 6 años. Para productores con limitaciones de maquinaria, lo más apropiado sería establecer pasturas al inicio, las cuales son menos intensivas en maquinaria que los cultivos.

Análisis de sensibilidad y riesgo

La rentabilidad de las actividades agropecuarias frecuentemente es afectada por riegos de tipo biológico y económico. Los primeros lesionan directamente la productividad de la agricultura; los segundos inciden sobre los precios de los productos e insumos agrícolas, afectando los ingresos y la rentabilidad.

La presencia de plagas y enfermedades actúa negativamente sobre los rendimientos agrícolas y, en consecuencia, sobre el desempeño económico de los proyectos productivos. En los cultivos se presentan variaciones estacionales (a través del año) de la producción y los precios, que obedecen principalmente a oscilaciones climáticas, tales como el exceso de lluvias, las sequías y heladas, etc.

A su vez, los precios del ganado presentan oscilaciones estacionales y cíclicas que afectan la rentabilidad del negocio ganadero. En Colombia, durante el primer semestre, debido a la sequía en la Costa Norte, disminuye la oferta de ganado gordo de esa región, aumentando la demanda y los precios en otras zonas como el Caquetá y los Llanos (Rivas y Seré, 1985). En el segundo semestre ocurre el fenómeno inverso. La Figura 6 muestra las variaciones estacionales del precio del ganado “costeño” y del “calentano” y de la oferta total de ganado en la plaza de Bogotá⁵.

También, a través de los años, los precios y la oferta ganadera presentan oscilaciones cíclicas, ampliamente analizadas por diferentes investigadores y que obedecen a razones técnicas y económicas (Jarvis, 1986; Fedegán, 1995) (Figura 7).

En la Figura 7, el índice de ciclicidad del sacrificio de vacunos corresponde a la relación hembras/sacrificio total con referencia al período base 1980. El precio real corresponde al promedio ponderado de hembras y machos, expresado en pesos constantes de 1970.

Dado lo anterior, es importante analizar los cambios en la rentabilidad de los proyectos agrícolas cuando se presentan condiciones adversas, tales como bajas de los precios recibidos

5. En la plaza de Bogotá se denomina ganado “costeño” al procedente de la Costa Norte, y “calentano” al de los Llanos Orientales.

por los productores, alzas en los costos, caída de los rendimientos, etc. Este análisis de sensibilidad muestra la solidez económica de una alternativa en evaluación, cuando aparecen situaciones críticas, y aporta una idea de su vulnerabilidad frente al riesgo.

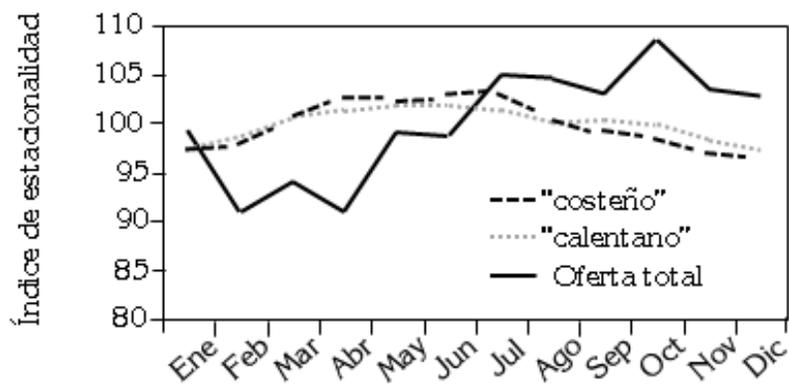


Figura 6. Índices de estacionalidad de los precios y de la oferta de ganado en Bogotá. 1975–1984.

FUENTE: Rivas y Seré (1985).

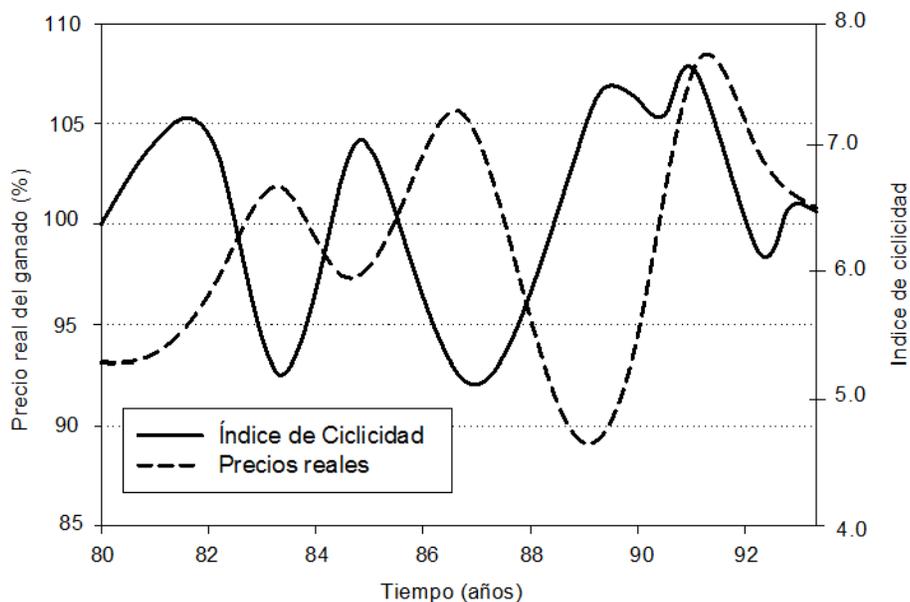


Figura 7. Índice de ciclicidad y precios reales del ganado en Colombia. 1980–1994.

FUENTE: Fedegán (1995).

En el Cuadro 12 se muestran los cambios en las tasas de rentabilidad de las opciones evaluadas, en situaciones hipotéticas alternativas, tales como reducciones de 10%, 20% y 30% de los precios del ganado y de los cultivos. Las fluctuaciones de los precios del ganado tienen relativamente poco impacto sobre el retorno económico, dado que en este caso específico se simuló una actividad de ceba, en la cual se compran novillos flacos y se venden gordos. Esto implica que al bajar los precios vacunos, se reducen los ingresos del productor, pero también el valor de compra del ganado flaco.

La alternativa 3, que tiene un fuerte énfasis ganadero, presenta gran estabilidad de sus rendimientos económicos, en situaciones de precios del ganado a la baja. Las otras dos alternativas consideradas exhiben alto grado de solidez, aunque ligeramente menor (Cuadro 12).

Cuadro 12. Sensibilidad de la tasa de retorno ante reducciones de los precios y rendimientos de la ganadería y los cultivos.

Cambios porcentuales	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3
Tasa interna de retorno (%)			
Precio del ganado			
Base	19.9	37.4	57.4
-10%	18.4	36.7	57.4
-20%	16.6	36.0	57.4
-30%	14.7	35.0	57.4
Precios de cultivos			
Base	19.9	37.4	57.4
-10%	16.2	32.3	33.9
-20%	12.1	26.6	18.4
-30%	8.0	20.1	8.7
Carga animal			
Base	19.9	37.4	57.4
-10%	18.4	36.7	57.4
-20%	16.6	36.0	57.4
-30%	14.7	35.0	57.4
Rendimiento de cultivos			
Base	19.9	37.4	57.4
-10%	16.2	32.3	33.9
-20%	12.1	26.6	18.4
-30%	8.0	20.1	8.7

Al analizar la conveniencia económica de emprender un proyecto de construcción de la capa arable en la altillanura, el nivel de los precios de los cultivos en el caso analizado es más crítico que el del ganado. Una reducción simultánea del 30% del precio real de los cultivos (arroz, maíz y soja) provocaría que un proyecto de esta naturaleza no fuera conveniente, ya que

las tasas de retorno bajarían dramáticamente a niveles inferiores a los del costo de oportunidad del capital. En la alternativa 1 caería de 19.9 a 8% y en la 3 de 57 a 8.7%. Reducciones de precio de esa magnitud colocarían a las opciones 1 y 3 casi en el mismo modesto nivel de rentabilidad.

La alternativa 1, que presenta el menor retorno económico, también es muy vulnerable en situaciones de bajas en los precios de los cultivos. Una caída de un 10% de los precios de éstos deterioraría gravemente su retorno económico, tornándola inconveniente. La respuesta de las tasas de rentabilidad ante reducciones porcentuales de la capacidad de carga de las praderas es totalmente simétrica, en cuanto a sentido y magnitud, a la de una baja porcentual igual en los precios del ganado. Esto se explica porque el ingreso bruto del componente ganadero se estima como:

$$IGB = (PG)(CA)(PV) \quad (1)$$

donde: *IGB* es el ingreso ganadero bruto
PG el precio por kilogramo del ganado en pie
CA la carga animal
PV el peso vivo de los novillos

Esto implica que un cambio porcentual de igual magnitud, en cualquiera de los factores que conforman el lado derecho de la expresión (1), tiene el mismo efecto porcentual sobre el ingreso ganadero bruto. Por la misma razón, los cambios porcentuales en los precios de los cultivos tienen un efecto similar y de igual proporción, en los indicadores de rentabilidad, que las variaciones porcentuales de los rendimientos físicos de los productos agrícolas (Cuadro 12).

La construcción de la capa arable en las fincas de la región deberá enfocarse desde una perspectiva de mediano y largo plazo. Si se estiman los indicadores de rentabilidad de las opciones examinadas, considerando el período exacto que se precisa para formar la capa arable, se observa que las alternativas 1 y 2 no resultan rentables (Cuadro 13).

Esto indica que, transcurrido el tiempo de formación, la actividad productiva debe prolongarse por unos años más, para poder recuperar la totalidad los fondos invertidos en el proyecto.

La opción 3, aparte de mostrar niveles de rentabilidad superiores a los de las opciones 1 y 2, presenta la particularidad de que los fondos invertidos en su implementación se recuperan mucho más rápidamente, por lo cual sus posibilidades de adopción son mayores.

Cuadro 13. Indicadores de rentabilidad considerando el período exacto de construcción de la capa arable en la altillanura de Colombia.

Alternativas	Tiempo de formación de la capa arable (años)	Indicadores de rentabilidad ^a	
		Valor presente neto ('000 \$/ha)	Tasa interna de retorno (%)
Alternativa 1 1 año de establecimiento de una pastura sola + 3 años de pastoreo + 1 año de rotación de cultivos	5	-958	-9.9
Alternativa 2 1 año de establecimiento de una pastura mixta asociada con un cultivo + 3 años de pastoreo + 1 año de rotación de cultivos	5	-82.6	13.2
Alternativa 3 3 años de rotaciones semestrales de cultivos + 1 año de establecimiento de una pastura mixta asociada con un cultivo	4	1258.3	61.3

a. Estimados para los períodos de tiempo que aparecen en la columna 2.

Conclusiones

La evaluación económica de tres alternativas de formación de capa arable en la altillanura oriental de Colombia muestra que estos desarrollos tecnológicos constituyen nuevas herramientas para que los productores de esa región y de otras con características edáficas similares, hagan un uso más sostenible y conservacionista de los suelos, a través de inversiones en la construcción de la capa arable de forma productiva y rentable.

Considerando la enorme extensión de la altillanura y sus innegables ventajas para desarrollar en ella sistemas agropecuarios sostenibles y de alta productividad, se infiere que la incorporación a la producción agropecuaria, de parte de estos recursos ubicados en la frontera agrícola colombiana, tendría un impacto económico y ambiental de gran magnitud.

A escala de productor individual aparece una amplia gama de beneficios si se implementan estrategias de uso y conservación de los suelos, mediante la aplicación de tecnologías basadas en el principio de capa arable: (1) Incrementos de los ingresos y de la rentabilidad de las inversiones. (2) Diversificación de la producción agropecuaria, lo que permite estabilizar ingresos y minimizar los riesgos propios de la agricultura. (3) Conservación de la capacidad productiva y del valor real de los recursos invertidos en la compra de tierra.

A escala más agregada, de región o país, los beneficios esperados son de tipo económico y ambiental. Los primeros están asociados con la ampliación de la oferta agregada de alimentos y de materias primas, que propicie bajas en el costo de la canasta de alimentos básicos y mejoras en el nivel nutricional de la población. Se espera que esta expansión productiva dinamice a otros sectores de la economía y ayude a incrementar el ritmo de crecimiento económico del país.

Un estudio previo sobre el potencial económico de las tecnologías de capa arable a escala regional estimó que si en el lapso de 10 años un área de 100 mil hectáreas actualmente en sabana nativa se incorpora progresivamente a la producción, usando el concepto de capa arable, el valor presente de las ganancias en productividad con respecto a las tecnologías tradicionales llegaría a US\$294 millones (Rivas, 2002).

Gran parte de la crítica a los sistemas agrícolas basados en el monocultivo y a la ganadería extensiva, en áreas como la altillanura colombiana, es su impacto negativo sobre la base de recursos de tierra, que resulta en el abandono de áreas degradadas y en la creciente ocupación de otras nuevas, colocando gran presión sobre los ecosistemas más frágiles. Las tecnologías propuestas son útiles, tanto para el manejo de suelos en peligro de degradación como para suelos ya degradados. De esto se desprende que el impacto de la adopción en gran escala de estas técnicas tendría un efecto ambiental positivo de gran relevancia para el país.

La recuperación de enormes extensiones de suelos degradados actualmente en producción y la utilización de otros aún no incorporados, empleando este tipo de tecnologías conservacionistas, presenta indudables ventajas ambientales en términos de reducción de tasas de deforestación y de conservación del patrimonio forestal y de biodiversidad de Colombia. En el futuro, y a medida que avance el proceso de adopción, estos aspectos deberán ser cuantificados y documentados.

Las tres opciones evaluadas son rentables y financieramente viables. Sin embargo, la alternativa 3 resulta más ventajosa por su mayor rentabilidad, su robustez frente a condiciones económicas desfavorables y por la rápida recuperación de los fondos invertidos.

La evaluación de la construcción de la capa arable debe enmarcarse dentro de una perspectiva de mediano y largo plazo, ya que se trata de un proceso de transformación de un activo de baja e inestable productividad en otro con características opuestas. Dado lo anterior, cualquier evaluación económica de corto plazo puede conducir a conclusiones erróneas, sobre la conveniencia de aplicar esta clase de tecnologías.

La siembra asociada de una pastura mixta (gramínea + leguminosa) con un cultivo es un aspecto clave para mejorar la viabilidad financiera y la rentabilidad económica de las alternativas de construcción de la capa arable. Los ingresos por la venta de la cosecha financian totalmente el costo de establecimiento de la pastura asociada. Este hecho ya ha sido

ampliamente demostrado y documentado en otros estudios económicos sobre el tema (Botero et al., 1990; Sanint et al., 1990; Cadavid, 1995).

Por esta razón, la alternativa 1, que incluye una pastura sola sin cultivo, resulta ser la menos atractiva desde el punto de vista económico. Pero si en su última fase se incluye una pastura con un cultivo asociado, su retorno económico mejora considerablemente.

Las rotaciones de pastos y de cultivos para la construcción de la capa arable generan economías en el uso de los insumos productivos, ya que se incrementa su eficiencia. El caso más claro es el de los fertilizantes, en donde el cultivo del segundo semestre aprovecha la fertilización residual del primer cultivo, lo cual implica significativas reducciones en su costo de establecimiento.

Dentro de la estructura de costos de establecimiento, tanto de las pasturas como de los cultivos, los de mayor relevancia son los de fertilización y de maquinaria, de tal manera que cualquier estrategia orientada a reducir estos costos debe enfatizar en esos dos factores de producción (Cuadro 14).

Cuadro 14. Participación porcentual de los costos de maquinaria y de fertilización en los costos directos de establecimiento de pastos y cultivos en la altillanura.

Costo	Pastura mixta: Gramínea + leguminosa	Pastura mixta asociada: Gramínea + leguminosa + cultivo		Cultivos en rotación	
		Arroz	Maíz	Maíz	Soya
Fertilización	56.9	46.8	35.1	50.0	39.9
Maquinaria	25.8	33.4	40.5	36.4	32.3

Las fases más avanzadas en la construcción de la capa arable posibilitan progresivamente la utilización de germoplasma con mayores requerimientos nutricionales y de mayor productividad, que aumentan el grado de complejidad de los sistemas agropecuarios; por ejemplo, frutales, caucho, árboles maderables, etc. En el futuro es conveniente elaborar estimaciones económicas, considerando esta clase de componentes.

En la presente evaluación se utilizaron parámetros técnicos conservadores por debajo de los observados, tanto a escala experimental como de finca, para evitar la sobreestimación de los beneficios económicos. Los resultados indican que se trata de opciones tecnológicas con un amplio potencial de impacto económico y ambiental, no solo en la altillanura oriental sino en otras regiones del país y del mundo, que confronten circunstancias similares.

El uso y manejo de los suelos a gran escala en el área objetivo, bajo el enfoque de construcción de capas arables, representa no solo un gran cambio de tipo técnico, sino que

precisa modificaciones significativas en la mentalidad del productor tradicional, que se especializa como agricultor o como ganadero. El empleo de estas nuevas alternativas para la utilización de los suelos en esta región de Colombia, requiere el desarrollo de unidades productivas muy diversificadas que incluyan múltiples componentes de cultivos, de ganadería y aún de forestería. El reto es generar en la región una dinámica de cambio a través de procesos participativos y de divulgación de información, que ayuden a romper esquemas y prácticas tradicionales.

Referencias

- Almanza M, EF; Argüelles T, O. 1998. Variabilidad de algunas propiedades físicas para efectos de la compactación de suelos agrícolas en la Orinoquia colombiana. Encuesta Nacional de Labranza Conservacionista, Villavicencio, Colombia.
- Amézquita E. 1998. Hacia la sostenibilidad de los suelos en los Llanos Orientales de Colombia. En: Manejo de suelos e impacto ambiental. Memorias. IX Congreso Colombiano de la Ciencia del Suelo, Paipa, Boyacá, 21–24 octubre 1998. Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo, Bogotá, DC. p 106–120.
- Amézquita E; Preciado G; Lal R; Thomas RJ. 1999. Changes in the soil physical condition as the time and intensity of use increase in tropical savanna (Oxisols) soils of Colombia, South America. Trabajo presentado en la 10a. Reunión de ISCO, 23–28 mayo 1999. Purdue University, West Lafayette, IN, Estados Unidos. 14 p.
- Amézquita E; Molina DI; Chávez LF; Ricaurte J. 2000a. La construcción de una capa arable: Práctica clave para la agricultura sostenible en suelos de la altillanura colombiana. Trabajo presentado en el II Seminario de Agrotecnia y Tecnología Siglo XXI – Orinoquia colombiana. Agosto 23–25, 2000. Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (Corpoica) y Programa Nacional de Transferencia de Tecnología (PRONATTA), Villavicencio, Colombia.
- Amézquita E; Rao IM; Molina DL; Phiri S; Lal R; Thomas RJ. 2000b. Constructing an arable layer: Key issue for sustainable agriculture in tropical savanna soils. En: Proceedings of the 15th ISTRO Conference on Tillage at the Threshold of the 21st Century: Looking Ahead, 2–7 julio 2000, Fort Worth, TX, Estados Unidos.
- Amézquita E; Thomas RJ; Rao IM; Molina DL; Hoyos P. 2001. The influence of pastures on soil physical characteristics of an Oxisol in the Eastern Plains (Llanos Orientales) of Colombia. Agriculture, Ecosystems and Environment (en revisión).
- Amézquita E; Hoyos P; Molina DL. 2004. Estrategias para la construcción de capas arables productivas en los suelos de la altillanura colombiana. Informe final CIAT-Pronatta, borrador, Cali, Colombia.
- Aristizábal Q, D; Baquero P, JE. 1999. Tecnologías conservacionistas para el manejo de suelos arroceros en la Orinoquia colombiana. Boletín Técnico No. 15. Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (Corpoica), Villavicencio, Colombia. 53 p.

- Botero R; Cadavid JV; Rivas L; Monsalve A; Sanint LR. 1990. Análisis económico *ex-ante* en sistemas de producción asociados: Cultivo arroz-pradera. Programas de Pastos Tropicales y de Arroz. Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), Cali, Colombia. (Mimeografiado.)
- Cadavid H, JV. 1995. Comportamiento y limitantes de la adopción de pastos y de cultivos asociados en los Llanos Orientales de Colombia. Tesis (M.Sc.). Universidad del Valle, Facultad de Ciencias Sociales y Económicas, Cali, Colombia.
- CIAT-Colciencias-Corpoica (Centro Internacional de Agricultura Tropical-Departamento Administrativo de Ciencia, Tecnología e Innovación-Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria). 1998. Construcción de una "capa arable" en suelos pobres: Conceptos esenciales aplicados en la altillanura. Plegable Divulgativo. Cali, Colombia.
- CIAT (Centro Internacional de Agricultura Tropical). 2000. Technical change in the savannas. En: Annual Report 2000. Cali, Colombia. p 150.
- Erosion and soil degradation. 2004. [en línea]. [citado 2 diciembre 2004]. Disponible en: <http://royal.okanagan.bc.ca/mpidwim/agriculture/erosion.html>
- Fedegán (Federación Colombiana de Ganaderos). 1995. La ganadería bovina en Colombia 1993–1994. Bogotá, Colombia.
- Fedegán (Federación Colombiana de Ganaderos). 2003. La ganadería bovina en Colombia 2002–2003. Bogotá, Colombia.
- GRID-Arendal. 1997. Soil degradation map. Disponible en: http://www.grida.no/db/maps/prod/global/tv01_1.gif [Geo-2-168]
- Hoyos P; Silva MR; Almanza EF. (1999) Impacto de diferentes usos y manejos del suelo en los cambios físicos, químicos y biológicos de los suelos de la Altillanura bien drenada. Proyecto interinstitucional CIAT-Corpoica-Unillanos. Informe final presentado a Pronatta, Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural de Colombia, Bogotá, Colombia.
- IGAC (Instituto Geográfico Agustín Codazzi). 2000. Estudio general de suelos del departamento del Meta. Bogotá. 500 p.
- ISRIC-UNEP-FAO (World Soil Information-United Nations Environment Programme-Food and Agriculture Organization of the United Nations). 1996. Human-induced soil degradation map. Disponible en: <http://www.fao.org/wfs/final/WFSmaps/Map12-e.pdf>
- Jarvis LS. 1986. Livestock development in Latin America. World Bank Report. Washington, DC, Estados Unidos.
- Mejía G, M. 1984. Orinoquia colombiana: Sabanas de la altillanura – Clima y uso de la tierra. Universidad Nacional de Colombia, Sede Palmira, Facultad de Ciencias Agropecuarias, Colombia. 196 p.

- Phiri S; Amézquita E; Rao I. 2003. Constructing an arable layer through chisel tillage and agropastoral systems in tropical savanna soils of the Llanos of Colombia. *Journal of Sustainable Agriculture* 23(1):5–29.
- Rippstein G. 1993. Management of native savanna on Colombia's Eastern Plains. CIAT Biennial Report. Working Document No. 134. Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), Cali, Colombia.
- Rivas L. 2002. Convenio de Cooperación Técnica y Científica MADR-CIAT: Impactos y resultados 1994–2002. Proyecto de Evaluación de Impacto. Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), Cali, Colombia (en imprenta).
- Rivas L; Seré C. 1985. Price and supply seasonality of beef in Colombia—Implications for the role of improved pastures. En: Trends in CIAT commodities. Internal Document Economics 1.10. Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), Cali, Colombia.
- Rivas L; Ramírez A; Seré C. 1990. Economic analysis of a grazing trail: The case of *Brachiaria decumbens* versus *Brachiaria decumbens* + *Pueraria phaseoloides* in the Eastern Plains in Colombia. En: Tropical Pastures Program Annual Report. Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), Cali, Colombia.
- Sanint LR; Rivas L; Seré C. 1990. Improved technologies for Latin America's new economic reality: Rice-pasture systems for the acid savannas. En: Trends in CIAT commodities 1990. Working Document No. 74, Economics Document No 1.15. Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), Cali, Colombia.
- Spain J. 1993. Sabanas neotropicales: Perspectivas para sistemas integrales de producción agropecuaria ecológica y económicamente sostenibles. Trabajo presentado en el Seminario Internacional sobre el Manejo Integrado de los Recursos Naturales en Ecosistemas Tropicales para una Agricultura Sostenible. Memorias. Instituto Colombiano Agropecuario (ICA), Subgerencia de Investigación. División de Proyectos Especiales. Santafé de Bogotá, Colombia. p 123–121.

PARTE IV

Conclusiones y Perspectivas

CAPÍTULO 16

La Investigación que Logró los Productos de Desarrollo de las Actividades del CIAT y de sus Socios Colaboradores en los Llanos de Colombia

M. Rivera¹, E. Amézquita², J. H. Bernal³ e I. M. Rao⁴

Enfoque de la investigación en el pasado y en el presente

Las principales áreas del enfoque de investigación adoptado por el Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT) y por sus socios colaboradores en los Llanos de Colombia son:

- Desarrollo de germoplasma de especies forrajeras y de cultivos adaptados a suelos ácidos (de 1979 hasta la fecha).
- Desarrollo de una tecnología de manejo de suelos que permita establecer pasturas de gramíneas solas y de gramíneas asociadas con leguminosas o recuperación de pasturas (1980–1990).
- Definición de los procesos que ocurren en el conjunto suelo-planta-animal para desarrollar un manejo sostenible de las pasturas introducidas (1989–1993).
- Estrategias para desarrollar una capa arable que permita establecer sistemas agropastoriles sostenibles (1993–2007).

Logros de la investigación

Las sabanas tropicales del mundo ocupan cerca del 43% de la tierra cultivable y de esta extensión el 27% está en América tropical. Las sabanas de América del Sur cubren, aproximadamente, 270 millones de hectáreas (Mha), distribuidos así: 207 Mha en Brasil, 28 Mha en Venezuela, 17 Mha en Colombia, 14 Mha en Bolivia y 4 Mha en Guyana

1. Física de suelos/Agronomía, Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), Cali, Colombia. m.rivera@cgiar.org
2. Física de suelos, Consultor Internacional. eamezquitac@gmail.com
3. Fisiología vegetal, Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (Corpoica), C.I. La Libertad, Villavicencio, Colombia. jhbernal@corpoica.org.co
4. Fisiología y Nutrición de plantas, CIAT. i.rao@cgiar.org

(Guimarães et al., 2004). Esta zona de sabanas marca una de las últimas fronteras del mundo para expandir la agricultura mediante sistemas que integren la explotación del ganado y de los cultivos.

Suelos

Los suelos bien drenados de la altillanura de los Llanos Orientales de Colombia, que cubren cerca de 4.6 Mha, se encaminan a una intensificación del aprovechamiento del suelo similar a la que se realizó en los Cerrados de Brasil, aunque a escala mucho menor, por las limitaciones en infraestructura y en acceso a insumos y maquinaria de la región colombiana. La productividad de estos suelos está restringida también por condiciones de la química del suelo similares a las de los Cerrados, es decir, baja acidez y alta toxicidad por Al y la disponibilidad de nutrientes, en particular del P, es baja. Ahora bien, los suelos ácidos de Colombia tienen una capacidad reducida de infiltración de agua y mayor susceptibilidad a la compactación que el suelo de los Cerrados (Amézquita et al., 2007; Ayarza et al., 2007). La razón de esta diferencia es que los suelos de la altillanura se formaron, principalmente, por la deposición de sedimentos provenientes de las montañas vecinas, mientras que los Cerrados brasileños se desarrollaron *in situ*.

1970–2000: Gramíneas y leguminosas

A partir de los años 70 se sustituyeron en Colombia las gramíneas nativas por pasturas mejoradas basadas en pastos del género *Brachiaria*. El resultado de este experimento fue duplicar la ganancia de peso vivo (GPV) por animal y aumentar de 10 a 15 veces la GPV por unidad de área (Lascano, 1991; Rippstein et al., 2001). Estas pasturas de gramínea sola, por falta de un manejo adecuado que incluyera la aplicación de fertilizante para su mantenimiento, se degradaron poco a poco. Esta degradación se agravó aún más porque estos pastos, sembrados en grandes extensiones, resultaron susceptibles a un insecto conocido como 'salivita'. Se hizo también un notable esfuerzo para introducir leguminosas forrajeras adaptadas a suelos ácidos con el fin de que, suministrando más N al sistema de pasturas, mejoraran la producción pecuaria y la mantuvieran en un nivel alto. Ahora bien, la tecnología de pasturas basada en leguminosas no fue adoptada ampliamente por los agricultores por dos razones: la leguminosa como componente de la pastura no fue persistente con el paso del tiempo, y el mercado solo disponía de cantidades limitadas de su semilla (Thomas et al., 2004).

2000–2010: Pasturas con cultivos

Una vez moderado el énfasis puesto en el desarrollo de variedades de leguminosas forrajeras como opciones para una buena pastura, la investigación se centró, en el último decenio, en el mejoramiento tanto de *cultivares de gramíneas* (por ejemplo, híbridos de especies de *Brachiaria*) que combinaban la adaptación a las principales limitaciones bióticas y abióticas de una pastura (Miles et al., 2004), como de *especies de cultivo*, en el papel de componentes de

la pastura, que estuvieran adaptadas a los suelos ácidos (resistiendo los niveles altos de Al y tolerando los niveles bajos de P del suelo), entre ellas el arroz de secano, el maíz, la yuca, el sorgo y la soya (Rao et al., 1993; Pandey et al., 1995; Valencia y Leal, 2004). Fue éste un gran esfuerzo de colaboración interinstitucional [Corpoica/CIAT/CIMMYT (Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria/Centro Internacional de Agricultura Tropical/Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo)] en la región latinoamericana. El establecimiento, en la sabana nativa, de pasturas constituidas por especies mejoradas de *Brachiaria* y por variedades de arroz y de maíz escogidas dio como resultado la producción de 2.5 a 3.5 t/ha de grano (o sea, 2.5–3.5 Mg/ha de grano) y una pastura establecida en excelentes condiciones (Narro et al., 2004; Sanz et al., 2004). El ingreso que generó la producción de los cultivos pagó el costo del establecimiento de la pastura. Además de este beneficio, la capacidad de carga y la GPV por animal individual en los sistemas de pastura y cultivos pueden aumentar dos veces más que las obtenidas en una pastura degradada, y 10 veces más si se comparan con las que se logran en la sabana nativa (Rincón y Ligarreto, 2008).

Sistemas agropastoriles

El forraje y los cultivos, como componentes de la pastura, fueron el punto de partida hacia el desarrollo de sistemas agropastoriles más intensivos y diversificados. La investigación halló que los sistemas de monocultivo en que se emplean altos niveles de insumos y un laboreo excesivo (con rastra de discos) no son sostenibles porque deterioran las propiedades físicas, biológicas y químicas del suelo y aumentan los problemas de la pastura debidos a las plagas y a las enfermedades (Ayarza et al., 2007). Se estudiaron entonces los sistemas alternativos que incorporan componentes capaces de atenuar, y aun revertir, los efectos nocivos de un monocultivo, y se desarrollaron medidas biofísicas de sostenibilidad como ‘predicciones’ de la ‘salud’ del sistema, con el fin de mantener la producción agrícola en un nivel alto; de este modo reduciendo al mínimo la degradación del suelo (Friesen et al., 1999). Se ensayaron entonces leguminosas de grano, abonos verdes, cultivos intercalados y agropastoriles como posibles componentes del sistema de pastura que aumentarían la estabilidad de los sistemas en que había cultivos anuales (Friesen et al., 1997; Oberson et al., 2006). Ahora bien, para que estos sistemas, más intensivos que los convencionales, y para que los sistemas silvopastoriles basados en componentes arbóreos de importancia económica fueran más productivos y sostenibles, se hizo necesario el desarrollo de estrategias de manejo del suelo.

Manejo sostenible

La solución que se halló para manejar estos suelos con el fin de que fueran productivos y sostenibles fue desarrollar en ellos una capa arable mediante la labranza vertical (con cinceles) para corregir ciertas condiciones físicas, agregarles cal y fertilizantes para enmendar sus condiciones químicas, y plantar en ellos, como componentes de la pastura, especies forrajeras y especies cultivadas mejoradas que se adapten a esas condiciones del suelo. De este modo, el fertilizante y las enmiendas agregadas pueden promover un crecimiento vigoroso de las raíces

de las gramíneas en la pastura para aumentar la fijación del carbono atmosférico (por 'secuestro') en las capas profundas del suelo (Fisher et al., 1994), reducir la nitrificación y la emisión de óxidos nitrosos desde el suelo (Subbarao et al., 2009), impulsar la actividad biológica del suelo y estabilizar su estructura física (Jiménez y Thomas, 2001; Amézquita et al., 2007).

Resultados

Aplicando esta tecnología de manejo integrado del suelo fue posible obtener los siguientes resultados: aumentar el rendimiento del maíz de 1.0 a 3.7 Mg/ha (3.7 t/ha) en los primeros años, a 5.4 Mg/ha (5.4 t/ha), en el tercer año, sembrando híbridos de maíz adaptados (Amézquita et al., 2004); incrementar la capacidad de carga hasta 4 animales/ha; y lograr hasta 100 kg/ha de GPV por animal (100 kg/animal por hectárea) sembrando los nuevos híbridos de *Brachiaria* spp. (Rincón y Ligarreto, 2008). Las tasas de infiltración de agua del suelo fueron mejoradas entre el doble y cinco veces más, la porosidad del suelo aumentó entre 13 y 21%, y su compactación se redujo en un porcentaje que está entre 10 y 15%. Los costos y los beneficios de los diferentes sistemas de ganado y cultivos introducidos como opciones elegibles fueron evaluados *ex ante*, en la escala de la finca, para cuantificar el impacto que causaría en ésta un sistema de producción diversificado (Amézquita et al., 2007). Asimismo, el impacto económico de los sistemas mencionados que se mejoraban con el desarrollo, a nivel regional, de una capa arable se calculó en US\$239 millones (cerca de Col\$440,000 millones, al cambio actual).

Retos para el futuro

- Si los agricultores desarrollan la idea del establecimiento de una capa arable y combinan esta tecnología de manejo del suelo, ya sea con cultivares de especies de forrajes y de cultivos adaptados a suelos ácidos en sistemas agropastoriles o ya con componentes arbóreos en sistemas silvopastoriles, tendrán (esos agricultores) los instrumentos y la tecnología para *transformar las sabanas colombianas*, elevando así la productividad agrícola y mitigando, además, el cambio climático (Rondón et al., 2006). No obstante, la inseguridad social y la falta de infraestructura limitan actualmente la tasa de adopción de estas innovaciones.
- Aunque el objetivo general de la investigación que se hace en las sabanas latinoamericanas es mejorar, frente al cambio climático, la eco-eficiencia de los sistemas de ganado y cultivos, el principal desafío que se enfrenta es *impulsar a los líderes nacionales y a la comunidad internacional* a que sigan apoyando los esfuerzos que hace la investigación para lograr el desarrollo sostenible de estas sabanas de suelo ácidos.

Referencias

- Amézquita E; Thomas RJ; Rao IM; Molina DL; Hoyos, P. 2004. Use of deep-rooted tropical pastures to build-up an arable layer through improved soil properties of an Oxisol in the Eastern Plains (Llanos Orientales) of Colombia. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 103(2):269–277.
- Amézquita E; Rao IM; Hoyos P; Molina D; Chávez LF; Bernal JH. 2007. Development of an arable layer: A key concept for better management of infertile tropical savanna soils. En: Bationo A; Waswa B; Kihara J; Kimetu J, eds. *Advances in integrated soil fertility research in sub Saharan Africa: Challenges and opportunities*. Springer, Países Bajos. p 96–101.
- Ayarza M; Barrios E; Rao IM; Amézquita E; Rondón M. 2007. Advances in improving agricultural profitability and overcoming land degradation in savanna and hillside agroecosystems of tropical America. En: Bationo A; Waswa B; Kihara J; Kimetu J, eds. *Advances in integrated soil fertility research in sub Saharan Africa: Challenges and opportunities*. Springer, Países Bajos. p 209–229.
- Fisher MJ; Rao IM; Ayarza MA; Lascano CE; Sanz JI; Thomas RJ; Vera RR. 1994. Carbon storage by introduced deep-rooted grasses in the South American savannas. *Nature* 371:236–238.
- Friesen DK; Rao IM; Thomas RJ; Oberson A; Sanz JI. 1997. Phosphorus acquisition and cycling in crop and pasture systems in low fertility tropical soils. *Plant and Soil* 196:289–294.
- Friesen D; Ayarza MA; Thomas RJ; Amézquita E; Sanz JI. 1999. Strategic systems research for the Latin American Savannas. En: Fujisaka S, ed. *Systems and farmer participatory research. Developments in research on natural resource management*. Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), Cali, Colombia. p 30–49.
- Guimarães EP; Sanz JI; Rao IM; Amézquita E. 2004. Research on agropastoral systems: What we have learned and what we should do. En: Guimarães EP; Sanz JI; Rao IM; Amézquita MC; Amézquita E; Thomas RJ, eds. *Agropastoral systems for the tropical savannas of Latin America*. Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), Cali, Colombia; Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa), Brasília, DF, Brasil. p 326–336.
- Jiménez JJ; Thomas RJ, eds. 2001. *Nature's plow: Soil macroinvertebrate communities in the neotropical savannas of Colombia*. Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), Cali, Colombia. 389 p.
- Lascano CE. 1991. Managing the grazing resource for animal production in savannas of tropical America. *Tropical Grasslands* 25:66–72.
- Miles JW; do Valle CB; Rao IM; Euclides VPB. 2004. Brachiaria grasses. En: Moser LE; Burson BL; Sollenberger LE, eds. *Warm-season (C4) grasses*. ASA-CSSA-SSSA, Madison, WI, Estados Unidos. p 745–783.

- Narro L; Pandey S; León A; Pérez JC; Salazar F. 2004. Maize varieties for acid soils. En: Guimarães EP; Sanz JI; Rao IM; Amézquita MC; Amézquita E; Thomas RJ, eds. Agropastoral systems for the tropical savannas of Latin America. Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), Cali, Colombia; Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa), Brasília, DF, Brasil. p 141–155.
- Oberson A; Bunemann EK; Friesen DK; Rao IM; Smithson PC; Turner BL; Frossard E. 2006. Improving phosphorus fertility through biological interventions. En: Uphoff N; Ball AS; Fernandes E; Herren H; Husson O; Laing M; Palm C; Pretty J; Sánchez P; Sanginga N; Thies J, eds. Biological approaches to improving the fertility and sustainability of soil systems. Marcel Dekker, Nueva York, Estados Unidos. p 531–546.
- Pandey S; Ceballos H; Granados G. 1995. Registration of four tropical maize populations with acid-soil tolerance: SA-4, SA-5, SA-6, SA-7. *Crop Science* 34:1230–1231.
- Rao IM; Zeigler RS; Vera R; Sarkarung S. 1993. Selection and breeding for acid-soil tolerance in crops: Upland rice and tropical forages as case studies. *BioScience* 43:454–465.
- Rao IM; Barrios E; Amézquita E; Friesen DK; Thomas R; Oberson A; Singh BR. 2004. Soil phosphorus dynamics, acquisition and cycling in crop-pasture-fallow systems in low fertility tropical soils of Latin America. En: Delve RJ; Probert ME, eds. Modelling nutrient management in tropical cropping systems. ACIAR Proceedings No. 114. Australian Centre for International Agricultural Research (ACIAR), Canberra, Australia. p 126–134.
- Rincón A; Ligarreto G. 2008. Productividad de la asociación maíz–pastos en suelos ácidos del Piedemonte Llanero colombiano. *Revista Corpoica – Ciencia y Tecnología Agropecuaria* 9:73–80.
- Rippstein G; Escobar G; Motta F, eds. 2001. Agroecología y biodiversidad de las sabanas en los Llanos Orientales de Colombia. Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), Cali, Colombia. 302 p.
- Rondón M; Acevedo D; Hernández RM; Rubiano Y; Rivera M; Amézquita E; Romero M; Sarmiento L; Ayarza MA; Barrios E; Rao IM. 2006. Carbon sequestration potential of the neotropical savannas (Llanos) of Colombia and Venezuela. En: Lal R; Cerri C; Bernoux M; Etchevers J; Cerri CEP, eds. Carbon sequestration in soils of Latin America. The Haworth Press, Inc., Binghampton, Estados Unidos. p 213–243.
- Sanz JI; Zeigler RS; Sarkarung S; Molina DL; Rivera M. 2004. Improved rice/pasture systems for native savannas and degraded pastures in acid soils of Latin America. En: Guimarães EP; Sanz JI; Rao IM; Amézquita MC; Amézquita E; Thomas RJ, eds. Agropastoral systems for the tropical savannas of Latin America. Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), Cali, Colombia; Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa), Brasília, DF, Brasil. p 240–252.
- Subbarao GV; Nakahara K; Hurtado MP; Ono H; Moreta DE; Salcedo AF; Yoshihashi AT; Ishikawa T; Ishitani M; Ohnishi-Kameyama M; Yoshida M; Rondón M; Rao IM; Lascano CE; Berry WL; Ito O. 2009. Evidence for biological nitrification inhibition in *Brachiaria* pastures. *Proceedings of the National Academy of Sciences (USA)* 106:17302–17307.

Thomas RJ; Rondón MA; Amézquita E; Ayarza MA; Asakawa N; Friesen D. 2004. Overcoming soil constraints in Latin American savannas: New approaches and potential trade-offs. En: Guimarães EP; Sanz JI; Rao IM; Amézquita MC; Amézquita E; Thomas RJ, eds. *Agropastoral systems for the tropical savannas of Latin America*. Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), Cali, Colombia; Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa), Brasília, DF, Brasil. p 309–325.

Valencia RA; Leal D. 2004. Genetic alternatives for production systems in the acid-soil savannas of the Colombian Orinoquia. En: Guimarães EP; Sanz JI; Rao IM; Amézquita MC; Amézquita E; Thomas RJ, eds. *Agropastoral systems for the tropical savannas of Latin America*. Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), Cali, Colombia; Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa), Brasília, DF, Brasil. p 127–140.

APÉNDICE 1

Publicaciones y Eventos Relacionados: Artículos en Revistas y Libros, Tesis, Pósteres, Cursos, Talleres, Seminarios, Congresos y Reportes

En este Apéndice, el acrónimo “CIAT” es usado en lugar de “Centro Internacional de Agricultura Tropical”.

Artículos en Revistas y Libros

- Amézquita E; Thomas RJ; Rao IM; Molina DL; Hoyos P. 2004. Use of deep-rooted tropical pastures to build-up an arable layer through improved soil properties of an Oxisol in the Eastern Plains (Llanos Orientales) of Colombia. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 103:269–277.
- Buehler S; Oberson A; Rao IM; Frossard E; Friesen DK. 2002. Sequential phosphorus extraction of a ³³P-labeled Oxisol under contrasting agricultural systems. *Soil Science Society of America Journal* 66:868–877.
- Decaëns T. 2001. Degradation dynamics of surface earthworm casts in grasslands of the Eastern Plains of Colombia. En: Jiménez JJ; Thomas RJ, eds. *Nature's plow: Soil macroinvertebrate communities in the neotropical savannas of Colombia*. CIAT, Cali, Colombia. p 176–192.
- Decaëns T; Rossi J.-P. 2001. Spatio-temporal structure of an earthworm community and soil heterogeneity in a tropical pasture (Carimagua, Colombia). En: Jiménez JJ; Thomas RJ, eds. *Nature's plow: Soil macroinvertebrate communities in the neotropical savannas of Colombia*. CIAT, Cali, Colombia. p 338–357.
- Decaëns T; Rangel AF; Asakawa N; Thomas RJ. 2001. Carbon and nitrogen dynamics in ageing earthworm casts in grasslands of the Eastern Plains of Colombia. En: Jiménez JJ; Thomas RJ, eds. *Nature's plow: Soil macroinvertebrate communities in the neotropical savannas of Colombia*. CIAT, Cali, Colombia. p 227–243.
- Decaëns T; Mariani L; Betancourt N; Jiménez JJ. 2001. Earthworm effects on permanent soil seed banks in Colombian grasslands. En: Jiménez JJ; Thomas RJ, eds. *Nature's plow: Soil macroinvertebrate communities in the neotropical savannas of Colombia*. CIAT, Cali, Colombia. p 274–293.
- Decaëns T; Jiménez JJ; Lavelle P. 2001. Effect of exclusion of the anecic earthworm *Martiodrilus carimaguensis* Jiménez and Moreno on soil properties and plant growth in grasslands of the Eastern Plains of Colombia. En: Jiménez JJ; Thomas RJ, eds. *Nature's plow: Soil macroinvertebrate communities in the neotropical savannas of Colombia*. CIAT, Cali, Colombia. p 329–337.
- Decaëns T; Lavelle P; Jiménez JJ; Escobar G; Rippstein G; Schneidmadl J; Sanz JI; Hoyos P; Thomas RJ. 2001. Impact of land management on soil macrofauna in the Eastern Plains of Colombia. En: Jiménez JJ; Thomas RJ, eds. *Nature's plow: Soil macroinvertebrate communities in the neotropical savannas of Colombia*. CIAT, Cali, Colombia. p 19–41.

- Decaëns T; Galvis JH; Amézquita E. 2001. Propriétés des structures produites par les ingénieurs écologiques à la surface du sol d'une savane colombienne. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences - Series III - Sciences de la Vie* 324(5):465–478.
- Decaëns T; Mariani L; Lavelle P. 2001. Soil surface macrofaunal communities associated with earthworm casts in grasslands of the Eastern Plains of Colombia. En: Jiménez JJ; Thomas RJ, eds. *Nature's plow: Soil macroinvertebrate communities in the neotropical savannas of Colombia*. CIAT, Cali, Colombia. p 255–273.
- Decaëns T; Asakawa N; Galvis JH; Thomas RJ; Amézquita E. 2002. Surface activity of soil ecosystem engineers and soil structure in contrasted land use systems of Colombia. *European Journal of Soil Biology* 38:267–271.
- Friesen DK; Rao IM; Thomas RJ; Oberson A; Sanz JI. 1997. Phosphorus acquisition and cycling in crop and pasture system in low fertility tropical soils. *Plant and Soil* 196:289–294.
- Mariani L; Bernier N; Jiménez JJ; Decaëns T. 2001. Diet of an anecic earthworm from the Colombian savannas: A question about ecological categories. En: Jiménez JJ; Thomas RJ, eds. *Nature's plow: Soil macroinvertebrate communities in the neotropical savannas of Colombia*. CIAT, Cali, Colombia. p 137–148.
- Phiri S; Amézquita E; Rao IM; Singh BR. 2003. Constructing an arable layer through chisel tillage and crop-pasture rotations in tropical savanna soils of the Llanos of Colombia. *Journal of Sustainable Agriculture* 23(1):6–29.
- Rangel AF; Thomas RJ; Madero E; Lavelle P; Friesen DK; Jiménez JJ; Decaëns T; Amézquita E. 1997. Efecto de la lombriz de tierra (*Martiodrilus carimaguensis* sp. Nov.) en la dinámica del nitrógeno de un Oxisol de los Llanos Orientales. *Revista Suelos Ecuatoriales* 27:235–241.
- Rangel AF; Thomas RJ; Madero E; Lavelle P; Friesen DK; Jiménez JJ; Decaëns T; Amézquita E. 1997. Efecto de la lombriz de tierra *Martiodrilus carimaguensis* sp. Nov. sobre el punto de carga cero (ZPC) de un Oxisol de los Llanos Orientales. *Revista Suelos Ecuatoriales* 27:241–247.
- Rangel AF; Madero E; Thomas RJ; Friesen DK; Decaëns T. 2001. Ion exchange properties of casts of the anecic earthworm (*Martiodrilus carimaguensis* Jiménez and Moreno) in a Colombian savanna Oxisol. En: Jiménez JJ; Thomas RJ, eds. *Nature's plow: Soil macroinvertebrate communities in the neotropical savannas of Colombia*. CIAT, Cali, Colombia. p 244–251.
- Rivera M; Amézquita E. 2003. Evaluación del modelo de simulación CERES-Maize aplicado a una variedad de maíz en Oxisoles de los Llanos Orientales de Colombia. *Acta Agronómica* 52(1–4):39–44.
- Rondón M; Acevedo D; Hernández RM; Rubiano Y; Rivera M; Amézquita E; Romero M; Sarmiento L; Ayarza MA; Barrios E; Rao IM. 2006. Carbon sequestration potential of the neotropical savannas (Llanos) of Colombia and Venezuela. En: Lal R; Cerri C; Bernoux M; Etchevers J; Cerri CEP, eds. *Carbon sequestration in soils of Latin America*. The Haworth Press, Inc., Binghampton, Estados Unidos. p 213–243.

Trabajos de Tesis

Tesis de Pregrado

Cepeda V, JA. 1996. Efecto de la lombriz *Martiodrilus carimaguensis* en la disponibilidad de fósforo en suelos de sabana de los Llanos Orientales. Tesis. Universidad Nacional de Colombia, Sede Palmira, Colombia. 100 p.

Céspedes S, NY; Ortiz C, AC. 2000. Caracterización de la macrofauna edáfica en los sistemas de producción de cultivos y de pastos para suelos ácidos de Altillanura colombiana. Culticore Fase II – Carimagua, Meta. Tesis. Universidad de los Llanos, Facultad de Ciencias Agropecuarias y Recursos Naturales, Villavicencio, Colombia. 160 p.

Rangel AF. 1996. Efecto de la lombriz de tierra *Martiodrilus carimaguensis* sp. en la dinámica del nitrógeno y el punto de carga cero (ZPC) de un Oxisol de los Llanos Orientales de Colombia. Tesis. Universidad Nacional de Colombia, Sede Palmira. 160 p.

Tesis de Posgrado (Maestría)

Borrero T, GA. 1998. Destinos del fósforo aplicado como fertilizante en Oxisoles y modelación del valor residual para cultivos. Tesis (M.Sc.). Universidad Nacional de Colombia, Sede Palmira, Colombia. 138 p.

Rivera P, M. 2003. Caracterización y evaluación de la respuesta al nitrógeno en sistemas de monocultivo y de rotación utilizando los modelos CERES-Rice y CERES-Maíz en Oxisoles de los Llanos Orientales. Tesis (M.Sc.). Universidad Nacional de Colombia, Sede Palmira, Colombia. 128 p.

Tesis de Posgrado (Doctorado)

Ateenyi Lubembe Twaha AB. 2004. Soil phosphorus transformations and organic matter dynamics as affected by improved fallow-crop systems, tillage and agropastoral systems in low fertility tropical soils of Colombia. Tesis (Ph.D.). Agricultural University of Norway, Noruega.

Decaëns T. 1999. Rôle fonctionnel et réponses aux pratiques agricoles des vers de terre et autres ingénieurs écologiques dans les savanes colombiennes. Tesis (Ph.D.). Especialidad Ecología. Universidad Pierre et Marie Curie, Paris VI, Francia. 412 p.

Jiménez J, JJ. 1999. Estructura de las comunidades y dinámica de las poblaciones de lombrices de tierra en las sabanas naturales y perturbadas de Carimagua (Colombia). Tesis (Ph.D.). Facultad de Ciencias Biológicas, Departamento de Biología Animal, Universidad Complutense de Madrid, España. 311 p.

Mariani L. 2001. Impact of the biostructures produced by *Martiodrilus carimaguensis* (Oligochaeta. Glossoscolecidae) on soil functioning in the savannas of the Eastern Plains of Colombia. Tesis (Ph.D.). Universidad Pierre et Marie Curie, Paris V, Francia. 233 p.

Transferencia de Resultados: Pósteres, Cursos, Talleres, Seminarios y Congresos

- Amézquita E. 1998. Hacia la sostenibilidad de los suelos en los Llanos Orientales de Colombia. En: Manejo de suelos e impacto ambiental. Memorias. IX Congreso Colombiano de la Ciencia del Suelo, Paipa, Boyacá, 21–24 octubre 1998. Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo, Bogotá, DC. p 106–120.
- Amézquita E. 1998. Propiedades físicas de los suelos de los Llanos Orientales y sus requerimientos de labranza. En: Romero C, G; Aristizábal Q, D; Jaramillo S, CA, eds. Memorias del Taller sobre “Encuentro Nacional de Conservación”, Villavicencio, Meta, 28–30 abril 1998. p 145–174.
- Amézquita E. 2000. El concepto de desarrollar una capa arable para mejorar la calidad del suelo. Póster presentado en el X Congreso de la Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo, Medellín, Colombia, 11–14 octubre 2000.
- Amézquita E. 2001. Soil physical characteristics and land degradation in savanna Oxisols of Colombia. Póster presentado en la International Conference on Land Degradation, 3; Meeting of the IUSS Subcommission C - Soil and Water Conservation, Río de Janeiro, Brasil, 14–22 septiembre 2001.
- Amézquita E; Preciado G; Arias D; Thomas RJ; Friesen DK; Sanz JI. 1998. Soil physical characteristics under different land use systems and duration on the Colombian savannas. En: Proceedings of the 16th World Congress of Soil Science on CD-ROM. Association française pour l'étude du sol, Montpellier, Francia. 6 p. (Presentación de pósteres)
- Amézquita E; Friesen DK; Sanz JI. 1999. Indicadores de sostenibilidad: Parámetros edafoclimáticos y diagnóstico del perfil cultural. En: Guimarães EP; Sanz JI; Rao IM; Amézquita MC; Amézquita E, eds. Sistemas agropastoriles en sabanas tropicales de América Latina. CIAT, Cali, Colombia; Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa), Brasília, DF, Brasil. p 49–64.
- Amézquita E; Rao IM; Molina DL; Phiri S; Lal R; Thomas RJ. 2000. Constructing an arable layer: Key issue for sustainable agriculture in tropical savanna soils. En: Proceedings of the 15th ISTRO Conference on Tillage at the Threshold of the 21st Century: Looking Ahead, 2–7 julio 2000, Fort Worth, TX, Estados Unidos.
- Amézquita E; Molina DL; Chávez LF; Ricaurte J. 2000. La construcción de una capa arable: Práctica clave para la agricultura sostenible en suelos de la Altillanura Colombiana. Trabajo presentado en el II Seminario de Agrociencia y Tecnología Siglo XXI – Orinoquía colombiana, 23–25 agosto 2000. Corpoica-Pronatta, Villavicencio, Meta, Colombia. 9 p.
- Amézquita E; Chávez LF; Molina DL; Galvis JH. 2002. Susceptibilidad a la compactación en diferentes sistemas de uso del suelo en los Llanos Orientales de Colombia. Trabajo presentado en el XI Congreso Colombiano de la Ciencia del Suelo, Cali, Colombia, 18–20 septiembre 2002.
- Amézquita E; Rivera M; Friesen DK; Thomas RJ; Rao IM; Barrios E; Jiménez JJ. 2002. Sustainable crop rotation and ley farming systems for the acid-soil savannas of South America En: Proceedings of the 17th World Congress of Soil Science, Bangkok, Tailandia, 14–21 agosto 2002.

- Amézquita E; Hoyos P; Molina DL; Corrales II; Chávez LF; Rivera M; Galvis JH. 2005. La construcción de una capa arable: Opción clave para una agricultura sostenible en suelos de la Altillanura Colombiana. Agroexpo, Bogotá, Colombia, Julio 2005.
- Chávez LF; Amézquita E; Galvis JH; Alvarez A. 1998. Características físicas de algunos perfiles de los suelos en Carimagua, Llanos Orientales de Colombia. En: Manejo de suelos e impacto ambiental. Memorias. IX Congreso Colombiano de la Ciencia del Suelo, Paipa, Boyacá, 21–24 octubre 1998. Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo, Bogotá, DC.
- Chávez LF; Galvis JH; Amézquita E; Alvarez A. 2000. Relación entre penetrabilidad y resistencia tangencial al corte en suelos de los Llanos Orientales de Colombia. Póster presentado en el X Congreso de la Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo, Medellín, Colombia, 11–14 octubre 2000.
- Corrales II; Amézquita E. 2002. Efecto de las malezas en los rendimientos de arroz y maíz en siembra directa en los Llanos Orientales. Trabajo presentado en el XI Congreso Colombiano de la Ciencia del Suelo, Cali, Colombia, 18–20 septiembre 2002.
- Corrales II; Amézquita E; Rivera M; Chávez LF. 2004. Condiciones físicas de un suelo bajo diferentes sistemas de labranza y su efecto sobre el comportamiento de cultivos y malezas en la Altillanura colombiana. En: Lobo L, D; Gabriels D; Soto G, eds. Evaluación de parámetros y procesos hidrológicos en el suelo. Compendio de los trabajos presentados en la VII Escuela Latinoamericana de Física de Suelos, La Serena, Chile, 2–14 noviembre 2003. Documento Técnico en Hidrología del PHI No. 71. Programa Hidrológico Internacional de la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO), París, Francia. p 101–106.
- Corrales II; Amézquita E; Rivera M; Chávez LF. 2004. Efecto de las condiciones físicas y químicas de un Oxisol de la Altillanura colombiana bajo diferentes tratamientos sobre los rendimientos y desarrollo en raíces en siembra directa. En: Valenzuela B, IG, compilador. Memorias XVI Congreso Latinoamericano de Suelo y XII Congreso Colombiano de la Ciencia del Suelo, 27 septiembre–1 octubre 2004, Cartagena, Colombia. Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo, Palmira, Colombia.
- Corrales II; Amézquita E; Rivera M; Chávez LF. 2004. Poblaciones de las malezas registradas en sistemas agrícolas en los Llanos Orientales de Colombia dentro del Proyecto Culticore Fase II. CNI-Carimagua 2000–2002. En: Valenzuela B, IG, compilador. Memorias XVI Congreso Latinoamericano de Suelo y XII Congreso Colombiano de la Ciencia del Suelo, 27 septiembre–1 octubre 2004, Cartagena, Colombia. Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo, Palmira, Colombia.
- Friesen DK; Thomas RJ; Sanz JI; Rao IM; Amézquita E; Decaëns T; Rippstein G; Vera, RR. 1996. Productive, soil conserving/improving systems for the tropical American savannas. Póster presentado en el 2nd International Crop Science Congress (ICSC), “Crop productivity and sustainability—Shaping the future”, Nueva Delhi, India, 16–22 noviembre 1996.
- Friesen DK; Thomas RJ; Rao IM; Amézquita E; Decaëns T; Sanz JI. 1997. Processes of soil degradation and recuperation under rotational production systems on savanna Oxisols. Póster presentado en el International Workshop on Green manure—Cover crop systems for smallholders in tropical and subtropical regions, Chapeco, Santa Catarina, Brasil, 6–12 abril 1997.

- Friesen DK; Thomas RJ; Rivera M; Asakawa N; Bowen W. 1998. Dinámicas del nitrógeno bajo monocultivos y cultivos en rotación en Oxisoles de las sabanas de Colombia. En: Manejo de suelos e impacto ambiental. Memorias. IX Congreso Colombiano de la Ciencia del Suelo, Paipa, Boyacá, 21–24 octubre 1998. Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo, Bogotá, DC.
- Rivera M; Amézquita E. 2000. Perfiles de conductividad hidráulica no saturada en los sistemas de uso de suelo: Arroz monocultivo, arroz en rotación con caupí y sabana nativa en los Llanos Orientales de Colombia. En: Memorias IV Escuela Latinoamericana de Física de Suelos (ELAFIS), Mérida, Venezuela, 16–20 noviembre 2000. Centro Interamericano de Desarrollo e Investigación Ambiental y Territorial (CIDIAT), Mérida, Venezuela.
- Rivera M; Amézquita E. 2001. Profiles of unsaturated hydraulic conductivity in land use systems: Rice monoculture, rice in rotation with cowpea and native savannah in the Eastern Plains of Colombia. En: College on Soil Physics realizado en el Abdus Salam International Centre for Theoretical Physics, Trieste, Italia, 12 marzo–6 abril 2001.
- Rivera M; Amézquita E. 2004. Caracterización de los sistemas en monocultivo y en rotación Oxisoles de los Llanos Orientales de Colombia. En: Valenzuela B, IG, compilador. Memorias XVI Congreso Latinoamericano de Suelo y XII Congreso Colombiano de la Ciencia del Suelo, 27 septiembre–1 octubre 2004, Cartagena, Colombia. Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo, Palmira, Colombia.
- Rivera M; Amézquita E. 2004. Evaluación del modelo CERES-Maize con la variedad Sikuaní V-110 en Oxisoles de los Llanos Orientales de Colombia. En: Valenzuela B, IG, compilador. Memorias XVI Congreso Latinoamericano de Suelo y XII Congreso Colombiano de la Ciencia del Suelo, 27 septiembre–1 octubre 2004, Cartagena, Colombia. Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo, Palmira, Colombia.
- Rivera M; Amézquita E; Chávez LF; Galvis JH. 2000. Perfiles de conductividad hidráulica no saturada, en algunos sistemas de uso del suelo: arroz monocultivo, arroz en rotación y sabana nativa. En: Memorias X Congreso de la Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo, Medellín, Colombia, 11–14 octubre 2000.
- Rivera M; Amézquita E; Chávez LF; Galvis JH; 2000. Perfiles de conductividad hidráulica no saturada, en algunos sistemas de uso del suelo (arroz monocultivo, arroz en rotación y sabana nativa) en los Llanos Orientales de Colombia. Poster presentado en el X Congreso de la Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo, Medellín, Colombia, 11–14 octubre 2000.
- Rondón MA; Acevedo D; Hernández RM; Rubiano Y; Rivera M. 2004. Potential for C sequestration in soils from the Llanos of Colombia and Venezuela. Presentación en el International workshop on potential of soil carbon sequestration in Latin America, Piracicaba, Brasil, 2–5 junio 2004.
- Rondón MA; Acevedo D; Hernández RM; Rao IM; Rubiano Y; Sarmiento L; Amézquita E; Rivera M; Ayarza MA; Barrios E; Romero M; Cerri C; Bernoux M; Volkoff B. 2004. Potencial para captura de carbono y reducción de emisiones de gases de efecto invernadero en la agricultura Latinoamericana. En: Valenzuela B, IG, compilador. Memorias XVI Congreso Latinoamericano de Suelo y XII Congreso Colombiano de la Ciencia del Suelo, 27 septiembre–1 octubre 2004, Cartagena, Colombia. Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo, Palmira, Colombia.

Reportes en Informes Anuales

- Amézquita E; Ayarza MA; Decaëns T; Fisher M; Friesen DK; Gijssman A; Thomas RJ. 1995. Mechanistic understanding and models of soil chemical, physical biological processes in agropastoral and sequential crop production systems. En: Tropical Lowlands Program; Annual Report 1995. CIAT, Cali, Colombia. p 38–47.
- Amézquita E; Bernal JH; Corrales II; Rao IM; Caicedo S; Barrios E; Thomas RJ; Jiménez JJ; Chávez LF; Asakawa N; Ricaurte J; Rivera M. 2001. Determine the influence of no-till systems on rooting depth and grain yield of maize. En: Overcoming Soil Degradation through Productivity Enhancement; Annual Report 2001. CIAT, Cali, Colombia. p 48–52.
- Amézquita E; Chávez LF. 1996. Rainfall patterns and effects on soil physical factors. En: Soils and Plant Nutrition Unit; Annual Report 1996. CIAT, Cali, Colombia. p 7–10.
- Amézquita E; Friesen DK; Rivera M; Rao IM; Barrios E; Jiménez JJ; Decaëns T; Thomas RJ. 2002. Sustainability of crop rotation and ley pasture systems on the acid-soil savannas of South America. En: Overcoming Soil Degradation through Productivity Enhancement; Annual Report 2002. CIAT, Cali, Colombia. p 264–272.
- Amézquita E; Friesen DK; Thomas RJ; Meléndez CG; Chávez LF; Galvis JH; Alvarez A; Rao IM. 1998. Soil strength and penetrability in the Culticore experiment, Carimagua. En: Overcoming Soil Degradation; Annual Report 1998. CIAT, Cali, Colombia. p 16–19.
- Arias DM; Amézquita E. 1997. Effect of drop impact on structural stability of some soils. En: Confronting Soil Degradation; Annual Report 1997. CIAT, Cali, Colombia. p 107–108.
- Asakawa N; Corrales II; Rondón M; Thomas RJ. 1996. Nitrogen fixation by cowpea and soybean in the Culticore experiment. En: Soils and Plant Nutrition Unit; Annual Report 1996. CIAT, Cali, Colombia. p 17.
- Barrios E; Corrales II; Asakawa N; Cobo JG; Thomas RJ; Friesen DK. 1999. Soil macroorganic matter and N mineralization in crop rotations and ley farming systems for acid-soil savannas of Colombia En: Overcoming Soil Degradation through Productivity Enhancement and Natural Resource Conservation; Annual Report 1999. CIAT, Cali, Colombia. p 108–112.
- Borrero G; Friesen DK; Oberson A; Rao IM. 1999. Test the suitability of different methods to assess soil P availability as a soil quality indicator. En: Overcoming Soil Degradation through Productivity Enhancement and Natural Resource Conservation; Annual Report 1999. CIAT, Cali, Colombia. p 112–117.
- Borrero G; Meléndez CG; Rodríguez M; Friesen DK. 1997 Identify key processes in nutrient cycles to minimize losses and improve use efficiency in systems. En: Confronting Soil Degradation; Annual Report 1997. CIAT, Cali, Colombia. p 60–61.
- Borrero G; Rodríguez GM; Friesen DK; Oberson A; Rao IM. 2001. Test the suitability of acid-ammonium oxalate extraction method to quantify the available soil phosphorus pool. En: Overcoming Soil Degradation through Productivity Enhancement; Annual Report 2001. CIAT, Cali, Colombia. p 114–117.

- Borrero G; Rodríguez M; Meléndez CG; Friesen DK. 1997. Dynamics of soil P pools under a maize-soybean rotation receiving annual and residual applications of P fertilizer. En: *Confronting Soil Degradation; Annual Report 1997*. CIAT, Cali, Colombia. p 109–110.
- Buehler S; Oberson A; Frossard E; Friesen DK; Rao IM. 2001. Impact of contrasting agricultural systems on P cycling as determined by sequential P extraction of ³³P-labelled oxisol. En: *Overcoming Soil Degradation through Productivity Enhancement; Annual Report 2001*. CIAT, Cali, Colombia. p 67–81.
- Buehler S; Oberson A; Frossard E; Sinaj S; Rodríguez GM; Friesen DK; Rao IM. 1999. Characterize genetically adapted crop and forage components for their ability to access soil pools using isotope exchange techniques. En: *Overcoming Soil Degradation through Productivity Enhancement and Natural Resource Conservation; Annual Report 1999*. CIAT, Cali, Colombia. p 26–33.
- Buehler S; Oberson A; Rao IM; Frossard E; Friesen DK. 2002. Sequential phosphorus extraction of a ³³P-labeled oxisol under contrasting agricultural systems. En: *Overcoming Soil Degradation through Productivity Enhancement; Annual Report 2002*. CIAT, Cali, Colombia. p 288–305.
- Corrales II; Asakawa N; Thomas R. 1997. Decomposition of crop residues and green manures in the Culticore experiment. En: *Confronting Soil Degradation; Annual Report 1997*. CIAT, Cali, Colombia. p 52–53.
- Corrales II; Asakawa N; Thomas RJ. 1996. Production of litter in grass-legume of the Culticore. En: *Soils and Plant Nutrition Unit; Annual Report 1996*. CIAT, Cali, Colombia. p 30.
- Corrales II; Rondón M; Asakawa N; Thomas RJ. 1996. Transfer of N from green manure crops of soybean and cowpea to a subsequent grain crop of rice or maize. En: *Soils and Plant Nutrition Unit; Annual Report 1996*. CIAT, Cali, Colombia. p 43–44.
- Daroub S; Ritchie J; Gerakis A; Wood S; Rivera M; Rao IM; Thomas RJ; Friesen DK. 2000. Compile data bases to feed into simulation models and decision support systems. En: *Overcoming Soil Degradation through Productivity Enhancement; Annual Report 2000*. CIAT, Cali, Colombia. p 115–121.
- Decaëns T; Lavelle P; Mariani L; Jiménez JJ; Thomas RJ; Amézquita E. 1998. Determine the effects of soil biota on soil fertility and structure. En: *Overcoming Soil Degradation; Annual Report 1998*. CIAT, Cali, Colombia. p 52–53.
- Decaëns T; Rangel AF; Asakawa N; Thomas RJ. 1999. Carbon and nitrogen dynamics in *in-situ* ageing earthworm casts in grasslands of the Eastern Plains of Colombia. En: *Overcoming Soil Degradation through Productivity Enhancement and Natural Resource Conservation; Annual Report 1999*. CIAT, Cali, Colombia. p 94–107.
- Fisher M; Jiménez JJ; Decaëns T; Moreno A; Rossii JP; Lavelle P; Thomas RJ. 1994. Dynamics and short-term effects of earthworms in natural and managed savannas of the Eastern Plains of Colombia. En: *Tropical Lowlands Program; Annual Report 1994*. CIAT, Cali, Colombia. p 208–216.
- Friesen DK. 1996. Determine nutrient use efficiency and fate of nutrients from fertilizer and organic sources. En: *Soils and Plant Nutrition Unit; Annual Report 1996*. CIAT, Cali, Colombia. p 30–43.

- Friesen DK; Bowen W; Thomas RJ; Asakawa N; Rivera M. 1998. Identify key processes in nutrient cycles to minimize losses and improve efficiency in systems. En: *Overcoming Soil Degradation; Annual Report 1998*. CIAT, Cali, Colombia. p 42–48.
- Friesen DK; Carmen H; Delgado H; Owen E; Thomas RJ; Fisher M; Gijssman A; Rao IM; Volverás B; Alarcón HF; Rippstein G; Lavelle P; Moreno A; Jiménez JJ. 1994. Sustainable crop rotation and ley farming systems for the acid-soil savannas of Colombia (Culticore experiment). En: *Tropical Lowlands Program; Annual Report 1994*. CIAT, Cali, Colombia. p 147–159.
- Friesen DK; Meléndez CG; Molina DL; Rivera M. 1997. Nutritional constraints and requirements of crop components in annual rotations of medium textured Oxisols. En: *Confronting Soil Degradation; Annual Report 1997*. CIAT, Cali, Colombia. p 32–35.
- Friesen DK; Rao IM; Thomas RJ; Oberson A; Sanz JI. 1997. Phosphorus acquisition and cycling in crop and pasture systems in low fertility tropical soils. En: *Confronting Soil Degradation; Annual Report 1997*. CIAT, Cali, Colombia. p 20–28.
- Friesen DK; Rivera M; Borrero G; Meléndez CG. 1996. Long-term crop rotation and ley farming systems experiment “Culticore”. En: *Soils and Plant Nutrition Unit; Annual Report 1996*. CIAT, Cali, Colombia. p 11–14.
- Friesen DK; Rivera M; Meléndez CG; Amézquita E; Thomas RJ; Chávez LF; Galvis JH; Alvarez A. 1999. Effect of different land management practices on soil physical conditions. En: *Overcoming Soil Degradation through Productivity Enhancement and Natural Resource Conservation; Annual Report 1999*. CIAT, Cali, Colombia. p 39–46.
- Friesen DK; Sanz JI; Molina DL; Rivera M. 1994. Crop nutritional requirements and input use efficiency on Llanos Oxisols under crop rotations. En: *Tropical Lowlands Program; Annual Report 1994*. CIAT, Cali, Colombia. p 223–233.
- Oberson A; Frossard E; Borrero G; Friesen DK; Rao IM. 1999. Test of suitability of microbially bound phosphorus as an indicator of soil biological fertility and of land use sustainability. En: *Overcoming Soil Degradation through Productivity Enhancement and Natural Resource Conservation; Annual Report 1999*. CIAT, Cali, Colombia. p 117–123.
- Ocampo G; Asakawa N; Thomas RJ. 1996. Selection of *Bradyrhizobium* strains for the improvement of nitrogen fixation in cowpea. En: *Soils and Plant Nutrition Unit; Annual Report 1996*. CIAT, Cali, Colombia. p 18.
- Rangel AF; Thomas RJ; Decaëns T; Jiménez JJ; Lavelle P; Madero E. 1996. Effect of earthworms on soil fertility. En: *Soils and Plant Nutrition Unit; Annual Report 1996*. CIAT, Cali, Colombia. p 63–64.
- Rao IM; Friesen DK; Granobles JC; Ricaurte J. 1996. Differences in fine root production and micorrhizal infection between degraded and regenerative systems. En: *Soils and Plant Nutrition Unit; Annual Report 1996*. CIAT, Cali, Colombia. p 53–59.
- Rao IM; Friesen DK; Meléndez CG; Ricaurte J. 1997. Determine differences in shoot and root attributes of system components in the savannas. En: *Confronting Soil Degradation; Annual Report 1997*. CIAT, Cali, Colombia. p 44–45.

- Rao IM; Friesen DK; Meléndez CG; Ricaurte J. 1997. Determine rooting strategies of crop and forage components. En: *Confronting Soil Degradation; Annual Report 1997*. CIAT, Cali, Colombia. p 46–47.
- Rao IM; Friesen DK; Meléndez CG; Ricaurte J. 1998. Determine differences in nutrient acquisition and utilization by maize. En: *Overcoming Soil Degradation; Annual Report 1998*. CIAT, Cali, Colombia. p 21–22.
- Rivera M; Molina DL; Meléndez CG; Friesen DK. 1997. Dynamics of exchangeable Ca, Mg and K in oxisols under cereal grain legume rotations (lime-Mg-K balance experiments). En: *Confronting Soil Degradation; Annual Report 1997*. CIAT, Cali, Colombia. p 61–69.
- Rivera M; Rodríguez M; Meléndez CG; Friesen DK. 1997. Estimate nutrient budgets in contrasting systems. En: *Confronting Soil Degradation; Annual Report 1997*. CIAT, Cali, Colombia. p 59–60.
- Rondón M; Corrales II; Asakawa N; Thomas RJ. 1997. Estimate nutrient budgets in contrasting system. En: *Confronting Soil Degradation; Annual Report 1997*. CIAT, Cali, Colombia. p 54–58.
- Rondón M; Thomas RJ; Amézquita E; Duxbury J. 1996. Effect of land use on the fluxes of greenhouse gases in the Colombian Llanos. En: *Soils and Plant Nutrition Unit; Annual Report 1996*. CIAT, Cali, Colombia. p 49, 53, 54.

APÉNDICE 2

Acrónimos Usados en el Texto

CAF	Corporación Andina de Fomento
Cenicafé	Centro Nacional de Investigaciones de Café
Cenipalma	Centro de Investigación en Palma de Aceite
CERES	Crop Environment Resource Synthesis
CGIAR	Consultative Group on International Agricultural Research
CIAT	Centro Internacional de Agricultura Tropical
CIET	Centro Internacional de Ecología Tropical
CIMMYT	Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo
Cirad	Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement
CNI	Centro Nacional de Investigación
Colciencias	Departamento Administrativo de Ciencia, Tecnología e Innovación
Corpoica	Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria
CPAC	Centro de Pesquisa Agropecuária dos Cerrados (de Embrapa)
CROPGRO	Simulation of Crop Growth
CTIC	Conservation Technology Information Center
DSSAT	Decision Support System for Agrotechnology Transfer
Embrapa	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
ENOS	Fenómeno El Niño/Oscilación del Sur
ETH	Instituto Federal Suizo de Tecnología Zurich
FAO	Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura
Fedegán	Federación Colombiana de Ganaderos
FEDESARROLLO	Centro de Investigación Económica y Social
FIBV	Fundación Instituto Botánico de Venezuela
FINAGRO	Fondo para el Financiamiento del Sector Agropecuario
FUDENA	Fundación para la Defensa de la Naturaleza
GLASOD	Global Land Assessment of Soil Degradation
GRID-Arendal	Centro colaborador del Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente

IBSNAT	International Benchmark Sites Network for Agrotechnology Transfer
ICA	Instituto Colombiano Agropecuario
ICRAF	World Agroforestry Centre
ICRISAT	International Crops Research Institute for the Semi-Arid Tropics
IDEAM	Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia
IDRC	International Development Research Centre
IFAS	Institute of Food and Agricultural Sciences
IFDC	International Fertilizer Development Center
IGAC	Instituto Geográfico Agustín Codazzi
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
IPE-CSIC	Instituto Pirenaico de Ecología-Consejo Superior de Investigaciones Científicas
IRD	Instituto de Investigación para el Desarrollo (<i>anteriormente</i> , ORSTOM)
ISRIC	World Soil Information
MADR	Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural
ORSTOM	La Oficina de la Investigación Científica y Técnica de Ultramar (<i>ver</i> IRD)
PRONATTA	Programa Nacional de Transferencia de Tecnología Agropecuaria
SAS	Statistical Analysis System
SIID	Sistema Integral de Información Departamental
SSSA	Soil Science Society of America
SWNM	Consortium of the CGIAR's Systemwide Program on Soil, Water and Nutrient Management
TSBF	Tropical Soil Biology and Fertility Program
UNEP	United Nations Environment Programme
Unillanos	Universidad de los Llanos
UNU-INWEH	United Nations University, International Network on Water, Environment and Health
USDA	United States Department of Agriculture
ZCIT	zona de convergencia intertropical

Documento de Trabajo CIAT No. 223

**Comunicaciones Corporativas,
Iniciativa de Fortalecimiento de Capacidades y
Gestión del Conocimiento del CIAT**

y

**Comunicaciones y Transferencia de Tecnología de
Corpoica, La Libertad**

Edición técnica:	Alberto Ramírez
Edición de producción:	Gladys Rodríguez
Producción:	Julio César Martínez (diseño de carátula)
Impresión:	Imágenes Gráficas S.A., Cali, Colombia



ISBN 978-958-694-117-4



CIENCIA, TECNOLOGÍA E INNOVACIÓN,
EL FUTURO DE LA
ORINOQUIA
CONVENIO MADR-CORPOICA-CIAT