

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 (Baijukya 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° 37' N y 71° 19' 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-V110, 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 soya 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 soya, 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 soya, 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 soya; 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 soya 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 soya, 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 soya 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 soya, 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-soya (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.

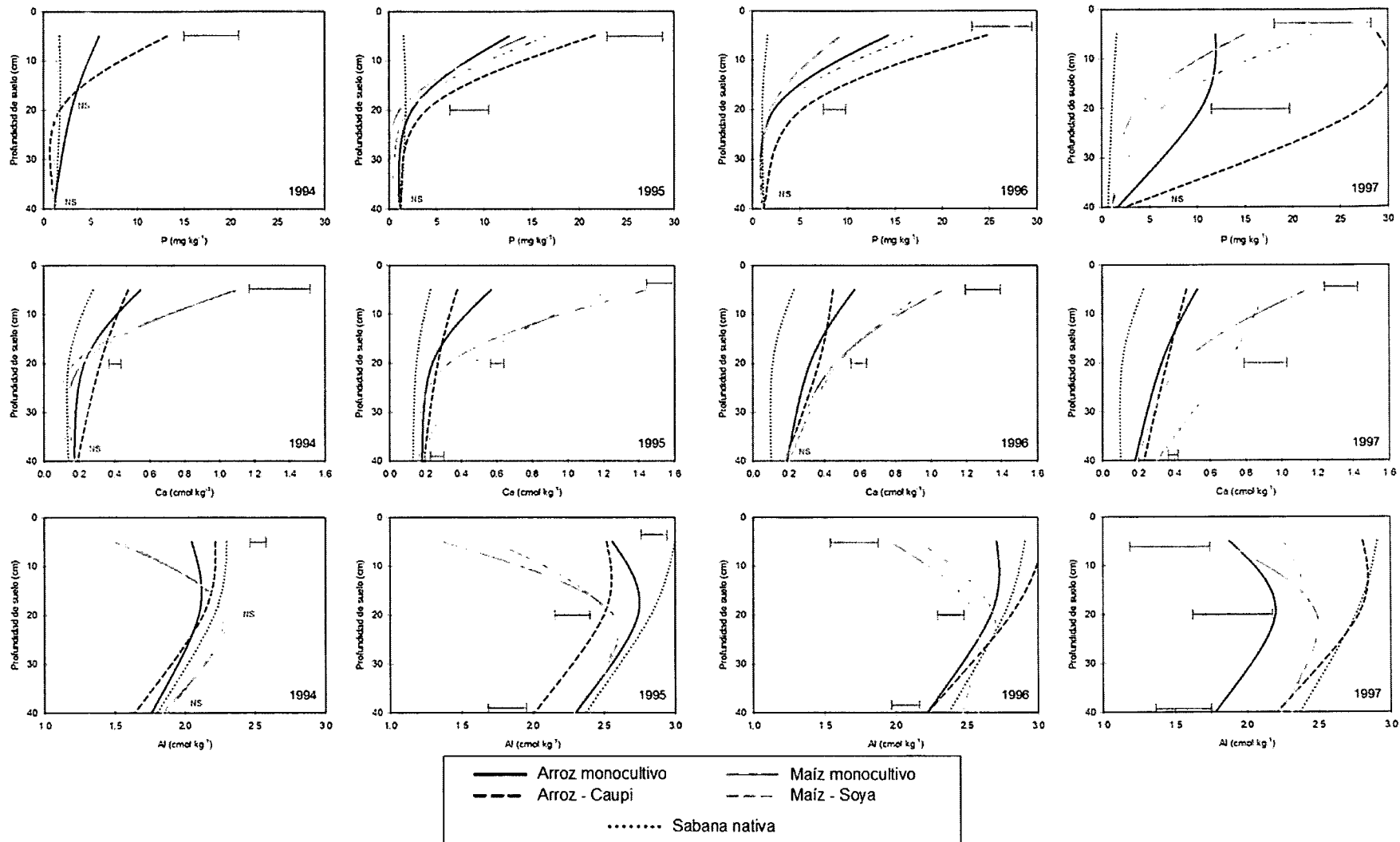


Figura 1. Valores promedio en el suelo de fósforo (P) disponible, calcio (Ca) y aluminio (Al) intercambiable en monocultivos, rotaciones y en sabana nativa, a profundidades de 0–10, 10–20 y 20–40 cm, de 1994 a 1997. Carimagua, Llanos Orientales de Colombia.

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).

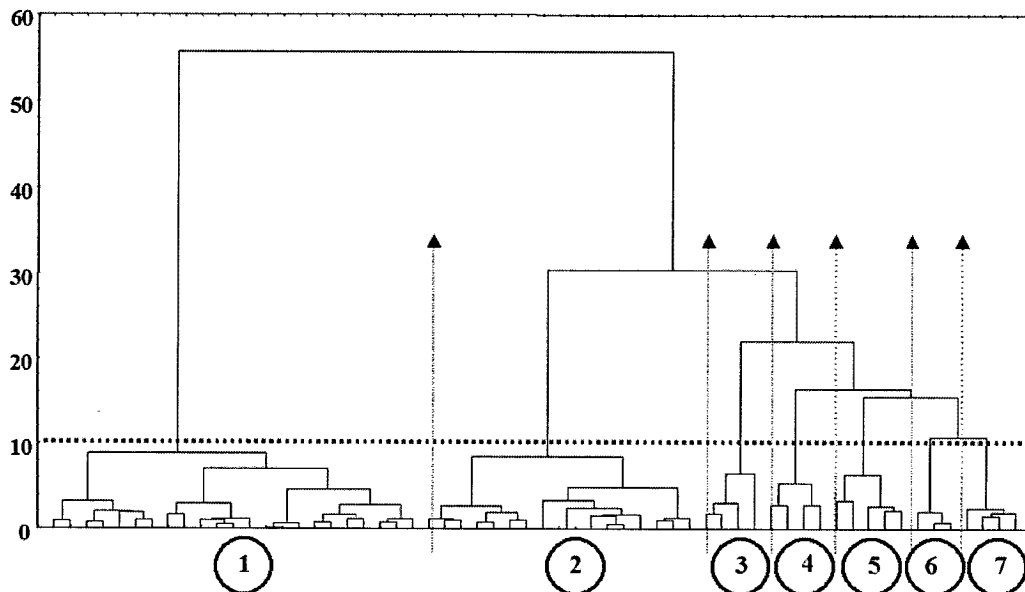


Figura 2. Agrupación por el método de Ward de los sistemas en monocultivo, rotación y en sabana nativa. Carimagua, Llanos Orientales de Colombia, 1997.

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; Kurle 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; Kladviko 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.