

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 caolínico 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 encalados 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°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 (NO₃⁻) 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 ¹⁵N 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

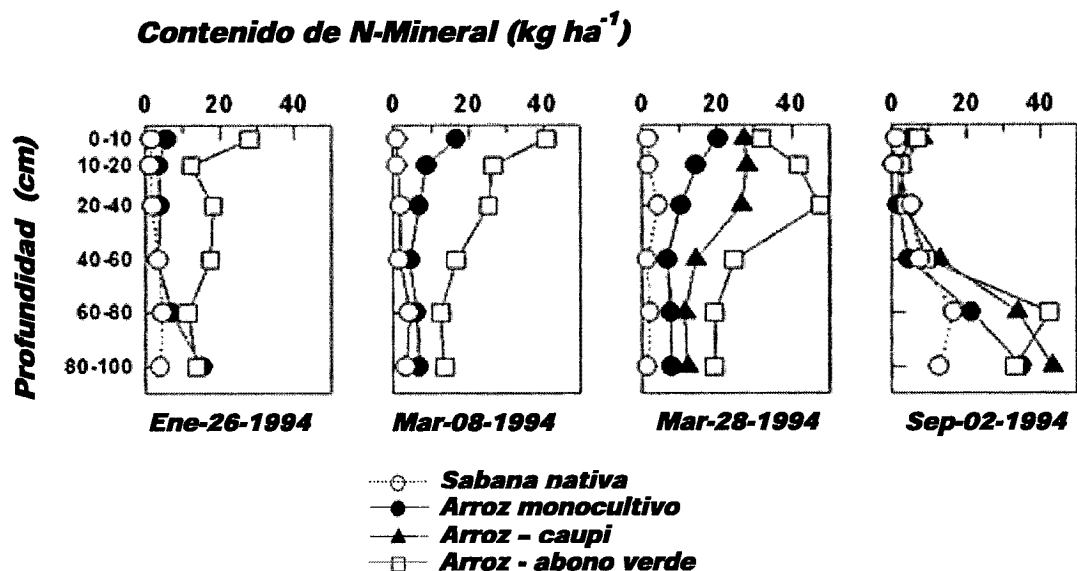


Figura 1. Evolución de las concentraciones del N-mineral en el perfil de un Oxisol, bajo sabana nativa, arroz monocultivo y arroz-rotación caupí (grano y abono verde) a través de la estación seca (enero a marzo) y después de la cosecha de arroz (septiembre). Carimagua, Llanos Orientales de Colombia.

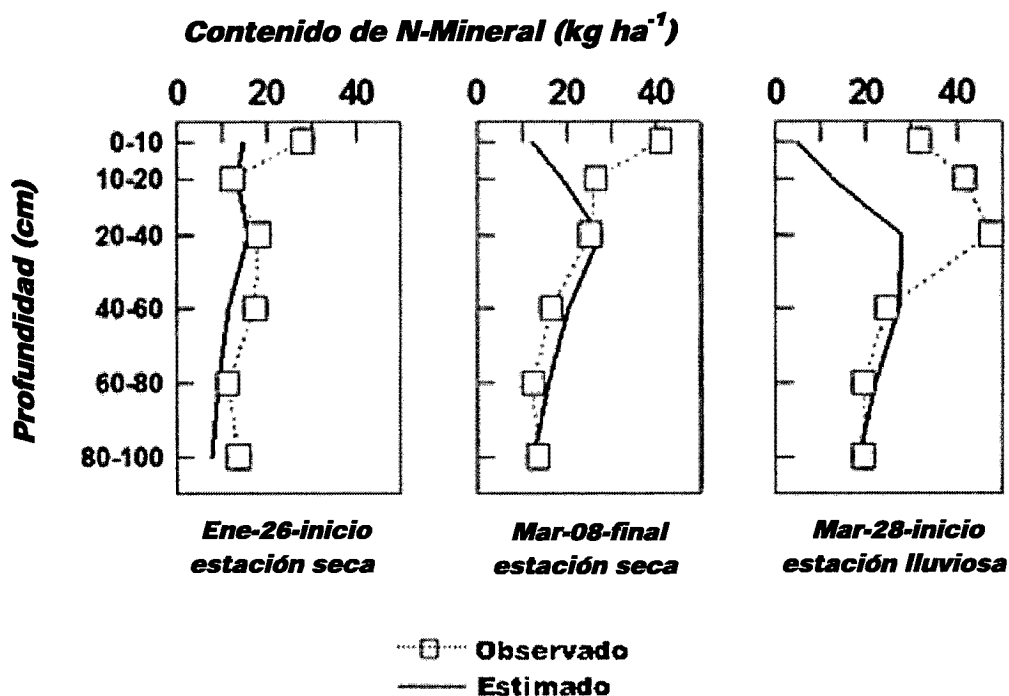


Figura 2. Nitrógeno mineral observado y estimado en el perfil de un Oxisol, bajo la rotación arroz-abono verde a través de la estación seca, seguida de la incorporación (noviembre 19 de 1994). Carimagua, Llanos Orientales de Colombia.

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.