

Influencia de abonos verdes sobre la dinámica de nitrógeno en un *Typic Haplustert* del Valle del Cauca, Colombia

Influence of Green Manure Crops on the Dynamics of Nitrogen in a *Typic Haplustert* of Valle del Cauca, Colombia

Breno Augusto Sosa Rodríguez¹, Marina Sánchez de Prager²
y Oscar Eduardo Sanclemente Reyes³

¹Universidad Nacional Autónoma de Honduras, Departamento de Suelos, Honduras; ² Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ciencias Agropecuarias, Colombia; ³ Universidad Nacional Abierta y a Distancia Escuela de Ciencias Agrícolas, Pecuarias y del Medio Ambiente, Colombia. Autor para correspondencia: brenososa8boy@yahoo.com

Rec.: 20.06.2013 Acep.: 04.04.2014

Resumen

Este estudio abordó el metabolismo del N, mediado por prácticas agroecológicas como los abonos verdes (AV), que incluyen leguminosas asociadas con rizobios -micorriza arbuscular y mejoran la nutrición de nitrógeno y fósforo. Se evaluó su influencia en la dinámica del nitrógeno de un *Typic Haplustert* en Candelaria (Colombia). En bloques completos al azar con seis repeticiones, se asoció como AV *Mucuna pruriens* L. var. Utilis – *Zea mays* L. var. ICA 305 (tratamiento 1- T1) y, la arvense nativa *Rottboellia cochinchinensis* L. como Tratamiento 2 – T2. En prefloración de *M. pruriens* se evaluó en el suelo el contenido de C orgánico (CO), N total (NT), nitrato, amonio, número de copias de gen *amoA* de las bacterias oxidantes de amonio (BOA), porosidad total del suelo (PPA), temperatura, flujo de gases con efecto invernadero: metano (CH₄), dióxido de carbono (CO₂) y óxido nitroso (N₂O); la materia seca (MS) y el contenido de C, N y P en tejidos vegetales. Se registraron concentraciones significativamente ($p < 0.05$) altas de CO, NT, amonio y nitrato, en T2. BOA fue significativamente mayor en T1, coincidiendo con mayor PPA y menor temperatura del suelo. El CO₂ atmosférico fue significativamente menor en T1, mientras que CH₄ y N₂O alcanzaron los valores más altos. Al finalizar el ensayo, AV en T1 aportó cerca de 4 t MS/ha, 1668.3 kg C/ha, 78.7 kg N/ha y 11.0 kg P/ha, con beneficio económico-social de 9.2 ton choclo/ha.

Palabras clave: Economía del cultivo, gases de efecto invernadero, nutrientes del suelo, prácticas agroecológicas.

Abstract

This study provided knowledge about the agro-ecosystem N dynamics mediated by the use of agroecological practices such as GM. GM is established as legume its symbiotic action with soil rhizobia and arbuscular mycorrhiza formation, allows the cycling of nitrogen and phosphorus, among others. This study aimed at evaluating the influence of GM in the nitrogen dynamics of a *Typic Haplustert* located in the municipality of Candelaria (Colombia). In completely randomized blocks design with six replications, the GM coming from the intercropping *Mucuna pruriens* var utilis - *Zea mays* L. var. ICA 305 was established as T1 treatment and the native arvense *Rottboellia cochinchinensis* L. as T2, during the second half of year 2011. During the stage of preflowering of *M. pruriens* the content of organic C (OC) was evaluated as well as total N (TN), nitrate, ammonium, number of copies of *amoA* gene of ammonia-oxidizing bacteria, total porosity filled with water (TPW), temperature, flow of greenhouse gases: methane

(CH₄), carbon dioxide (CO₂) and nitrous oxide (N₂O), as well as the dry matter (DM) and the contents of C, N and P in plant tissues. Significantly higher concentrations ($p < 0.05$) of CO, NT, ammonium and nitrate, were recorded in T2. The number of oxidizing bacteria of ammonium was significantly higher in T1 which coincided with the higher TPW and the lower soil temperature. The emission of atmospheric CO₂ was significantly lower in T1, in contrast to the CH₄ and N₂O which scored the highest values. At the end of the trial, the GM in T1 provided about 4 t MS / ha, 1668.3 kg C / ha, 78.7 kg N / ha and 11.0 kg P / ha, with social economic benefit of 9.2 t corn/ha.

Keywords: Agro-ecological practices, economics of cultivation, soil nutrients, greenhouse gas GHG.

Introducción

La producción de alimentos en los agroecosistemas, está sujeta entre otros factores, a las condiciones del suelo, la disponibilidad y aporte de nutrientes en forma natural y/o externa mediante insumos de síntesis industrial. El nitrógeno (N) es tal vez el nutriente más importante y limitante en el agroecosistema, dada su participación en múltiples reacciones bioquímicas implicadas fisiológicamente en el crecimiento, desarrollo y producción de cultivos (Rao, 2009). Sin embargo, en la actualidad el aporte de N al suelo vía fertilización de síntesis química industrial, es poco viable desde el punto de vista económico y ambiental, lo que implica la búsqueda de nuevas alternativas para la fijación, aporte y ciclaje en el agroecosistema (Sánchez y Logan, 1992; Prager *et al.*, 2012; Sanclemente, 2013).

Aproximadamente el 45% de los suelos en las regiones tropicales de países en desarrollo presentan limitaciones en su fertilidad natural (Giller, 2001), además de condiciones climáticas que estimulan altas tasas de descomposición de la biomasa vegetal (Woomer *et al.*, 1994; Navia, 2006). El uso de prácticas agronómicas económica y ambientalmente insostenibles, incrementan los riegos de degradación de estos suelos (Amézquita *et al.*, 1998; Altieri, Funes & Petersen, 2012). Algunas investigaciones indican que el actual desbalance del ciclo biogeoquímico del N, es ocasionado por el uso inadecuado de fertilizantes de síntesis industrial, implicando la degradación de suelos, la eutrofización de ecosistemas acuáticos y la emisión de gases de efecto invernadero (GEI), con consecuencias sobre el cambio climático global (Galloway *et al.*, 2003; Rockström *et al.*, 2009).

La agricultura industrial en la mayoría de los países, tiene como propósito obtener

la máxima productividad agroecosistémica a través del uso de agroquímicos, en su mayoría de síntesis industrial como los fertilizantes nitrogenados. Sin embargo, diferentes investigaciones demuestran que la aplicación de estos fertilizantes conlleva pérdidas de cerca del 60% por vías como la lixiviación, volatilización y escorrentía, con efectos sobre la contaminación del agua por nitratos y nitritos y, del aire por óxido nitroso (N₂O) y dióxido de N (NO₂) (Raun y Johnson, 1999; Glass, 2003; Davidson *et al.* 2012). Estas pérdidas van acompañadas por procesos de degradación física, química y biológica de los suelos (MEA, 2005; FAO, 2008).

De manera alternativa al modelo industrial, tecnologías agroecológicas como los AV aportan materia orgánica, agua y nutrientes al suelo de manera sostenible (Prager *et al.*, 2012), destacándose el uso de leguminosas como el frijol terciopelo *Mucuna pruriens* L. var. *Utilis* por su fijación anual de hasta 150 kgN/ha, ciclaje de P y otros nutrientes por intermediación simbiótica (Blanchart *et al.*, 2006). *M. pruriens* genera asociaciones simbióticas con rizobios y hongos micorrízicos arbusculares (HMA) de forma natural, brindando servicios ecológicos al agroecosistema, sobre todo en términos de la economía de N y P como elementos fundamentales (Sánchez de P. *et al.*, 2010). Por su parte, la biomasa de gramíneas como el maíz *Zea mays* L. aporta grandes cantidades de C y lignina al suelo, posibilitando los procesos de humificación y formación de materia orgánica estable MOS, siendo óptima su mezcla con leguminosas, para el mejoramiento de la relación C/N de los AV (Prager *et al.*, 2012; Sanclemente, 2013). De esta forma, los intercultivos leguminosa-gramínea, logran la sincronía requerida para optimizar el aporte de materia orgánica al

suelo y la liberación gradual de nutrientes al cultivo de interés comercial (Baligar y Fageria, 2007; Prager *et al.*, 2012).

En el Valle del Cauca (Colombia), el Grupo de Investigación en Agroecología de la Universidad Nacional de Colombia sede Palmira, investiga sobre el uso de AV en busca de comprender aspectos como la dinámica de nutrientes en el agroecosistema, cuantificar su aporte en términos de nutrición vegetal y establecer indicadores para optimizar su adecuada utilización en diferentes zonas agroecológicas. Por ello, el objetivo de esta investigación se centró en hacer seguimiento de algunos indicadores, que ayuden a comprender la dinámica del N cuando se acude a la tecnología de AV y el barbecho.

Materiales y métodos

Caracterización del área experimental

El estudio se realizó entre agosto-noviembre del 2011, en suelos del Centro Experimental de la Universidad Nacional de Colombia, sede Palmira (CEUNP), ubicado en el corregimiento El Carmelo, municipio de Candelaria, Valle del Cauca (Colombia). El sitio del ensayo, se georreferenció 3° 25' 34" N y 76° 25' 53" O, altitud de 980 msnm, temperatura promedio de 24 °C, humedad relativa de 69% y, precipitación media anual de 1406 mm. El suelo se clasificó como *Typic Haplustert* franco fino isohipertérmico con pendiente de 1% (Acosta *et al.*, 1997), textura franco arcillosa, pH de 6.8, 2% de materia orgánica (MO) y uso en barbecho durante aproximadamente ocho años.

Descripción del ensayo experimental

Se establecieron los AV con la siembra del intercultivo 2x1 *M. pruriens* var. *Utilis* (accesión CIAT No. 9349) a razón de 110 kg/ha de semilla- maíz *Zea mays* L. var. ICA 305 a razón de 14 kg/ha de semilla, como tratamiento T1 y, el sistema de barbecho constituido principalmente por la arvense *Rottboellia cochinchinensis* L. como T2 (control), bajo diseño de bloques completos al azar y seis repeticiones. Las unidades experimentales fueron parcelas en campo 5 de 30 m² (6x5m), divididas por calles de 0.5 m y un metro de

separación entre las repeticiones, para un área total del experimento de 900 m².

En etapa fenológica de prefloración de *M. pruriens* (90 días después de siembra), se evaluaron algunas variables, en el suelo: CO, N total, nitrato, amonio (CIAT, 2006), número de copias de gen amoA de las bacterias oxidantes de amonio (BOA) del suelo por técnica molecular PCR en tiempo real (qPCR) (Subbarao *et al.*, 2009), porosidad total del suelo (PPA) por método del cilindro biselado y picnómetro (Escobar, 2011); tomando muestras compuestas de cinco submuestras en cada parcela útil. La temperatura del suelo se estimó en tiempo real con termómetro digital y el flujo de gases con efecto invernadero: metano (CH₄), dióxido de carbono (CO₂) y óxido nitroso (N₂O) se evaluó por el método de cámara cerrada estática (Novoa *et al.*, 2011). En tejido vegetal se evaluó el contenido de materia seca (MS), y de C, N y P (CIAT, 2006), tomando muestras compuestas de diez plantas dentro de la parcela útil. En todas las parcelas, se aplicó foliarmente Fe, Cu y Zn en forma de quelatos, debido a su deficiencia. En época seca, se realizó irrigación con aguas subterráneas mediante cañón de riego. La información obtenida se sometió a análisis de varianza (p<0.05) y prueba de medias de Duncan (p<0.05), con el uso del software SAS versión 9.1.3 (2006).

Resultados y discusión

Variables ligadas al suelo

El análisis de varianza en las variables del suelo (Cuadro 1), mostró diferencias altamente significativas entre los tratamientos T1 y T2, para N total, NH₄⁺, NO₃⁻, N-inorgánico (NH₄⁺ NO₃⁻) y BOA. Sin embargo, no se registraron diferencias para la variable CO que mantuvo contenidos cercanos a 26 g/kg, indicando similar influencia de los tratamientos.

Los contenidos de N total del suelo en el T2 (1174.50 mg/kg) fueron cerca de 25% mayores que en el T1 (881.16 mg/kg) indicando predominio del proceso de mineralización en el barbecho, con posibles pérdidas (Figura 1a). Lo anterior, se pudo evidenciar con las fracciones significativamente altas de N-inorgánico (NH₄⁺ NO₃⁻) en el T2 (18.26 mg/kg),

Cuadro 1. Análisis de varianza para las fracciones de C, N y BOA en el suelo.

FV	Gl	C. org.		N total		Amonio		Nitrito		N-inorg.		BOA ^a	
		CM	Pr > F	CM	Pr > F	CM	Pr > F	CM	Pr > F	CM	Pr > F	CM	Pr > F
Bloque	5	0.053	0.418	18.0	0.844	0.007	0.307	0.02	0.0001	0.666	0.422	1.273	0.070
Trat.	1	0.4704	0.073 ^{ns}	129072.5	0.0008 ^{**}	1.188	0.0027 ^{**}	159.13	0.0001 ^{**}	152.30	0.0032 ^{**}	1.371	0.0007 ^{**}
Media		26.33		1027.83		4.86		8.69		13.22		4,12E+08	
CV		0.7476		0.96		1.16		1.94E-6		5.27		0.75	
R ²		0.88		0.99		0.99		1.0		0.99		0.99	

a. Bacterias oxidantes de amonio. (número de copias de gen *amoA*/g suelo seco).

*= significativo (P<0.05); **= altamente significativo (P<0.01); ns= no significativo.

siendo cerca de 51% mayores al T1 (8.85 mg/kg), donde el proceso de fijación de N₂ en *M. pruriens* logra suministro del elemento a la planta, reduciendo el proceso de mineralización del suelo (Figura 1b). De igual forma, la alta absorción del N- inorgánico por el maíz en el T1 para el llenado de granos, reduce la concentración de los nutrientes en el suelo, sobre todo en forma de N- NO₃.

Las poblaciones de BOA, asociadas a procesos de nitrificación (Figura 2), registraron incrementos significativos en el T1 (4.59E+08 copias de gen *amoA* BOA/g suelo seco), comparadas con T2 (3.64E+08 copias de gen *amoA* BOA/g suelo seco). Estos resultados, coincidieron con altos contenidos de NH₄⁺ en el T1, como nutriente aprovechable por las BOA en procesos metabólicos por intermediación enzimática, implicando nitrificación en el suelo (McNeill y Unkovich, 2007).

Las BOA llegan incluso a doblar sus poblaciones apenas siete días después de establecerse AV, lo que indica una actividad metabólica rápida que permite la liberación gradual de nitratos al suelo para su aprovechamiento por otros cultivos como el maíz (Clark, 2007; Gallego, 2012). Resultados de otras investigaciones registran que los mayores picos de liberación de NH₄⁺ en el suelo se presentan a las dos semanas de la incorporación de los AV, mientras que para NO₃⁻ estos picos se revelan a las cuatro semanas (Cobo *et al.*, 2002; Bajjukya *et al.*, 2004; Cobo *et al.*, 2008).

La actividad de microorganismos como las BOA, no sólo implica liberación de nutrientes al suelo sino también la emisión de gases de efecto invernadero GEI (Figura 3). En este ensayo, se observó relación entre las variables

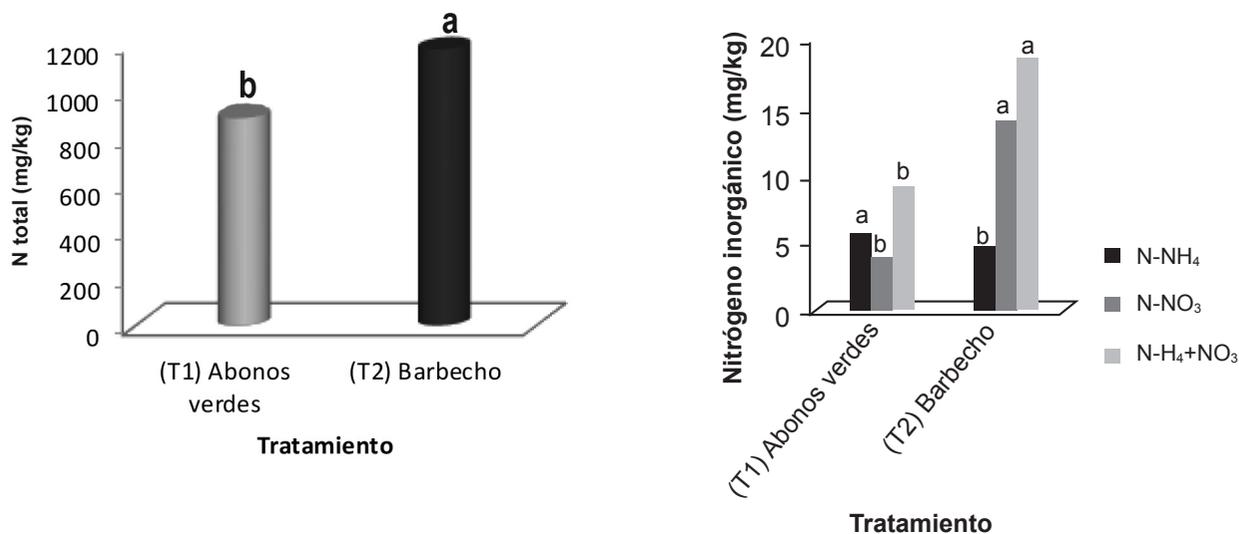


Figura 1. Caracterización química de N total (a) y NH₄⁺, NO₃⁻ y N-inorgánico (NH₄⁺+NO₃⁻) (b) en el suelo, 90 días después del establecimiento de barbecho y abonos verdes.

Promedios con letras iguales no son significativamente diferentes (P>0.05), según la prueba de Duncan. Análisis del Laboratorio de Servicios Analíticos del CIAT. 2011.

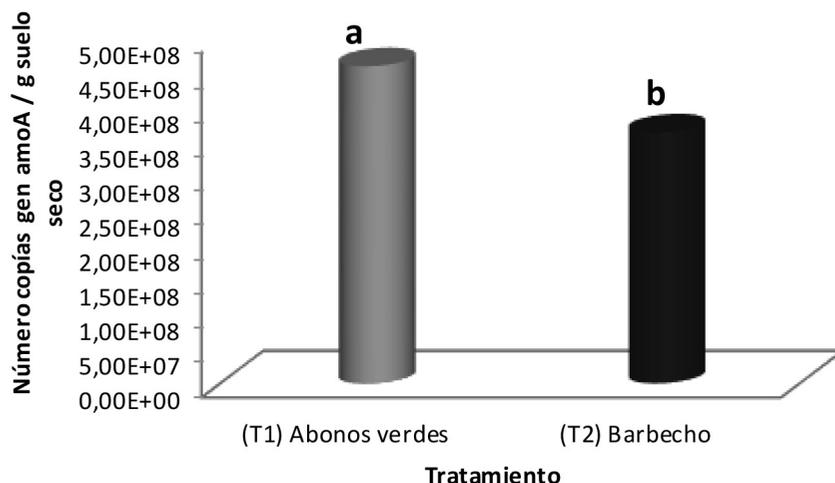


Figura 2. Actividad de BOA (número de copias de gen amoA/g suelo seco) 90 días después del establecimiento de barbecho y mucuna (abono verde).

Promedios con letras iguales no son significativamente diferentes ($P>0.05$), según la prueba de Duncan.

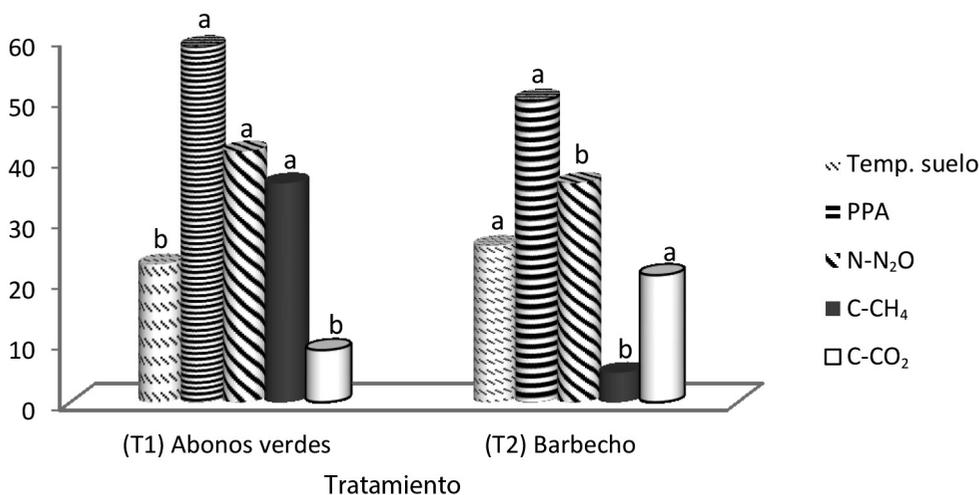


Figura 3. Evaluación del flujo de gases con efecto invernadero -GEI: CO₂ (mg/m²/h), CH₄ y N₂O (μg/m²/h), PPA (%) y temperatura del suelo (°C), 90 días después del establecimiento de barbecho y mucuna (abono verde).

Promedios con letras iguales no son significativamente diferentes ($P>0.05$), según la prueba de Duncan.

temperatura y PPA del suelo con respecto a la emisión de GEI (CH₄, N₂O y CO₂).

El análisis de varianza registró diferencias altamente significativas entre tratamientos para casi todas las variables, con excepción de PPA (Cuadro 2). La temperatura del suelo en T1 (22.7 °C), fue significativamente

menor a T2 (25.7 °C), favoreciendo la emisión de CH₄ (36.04 μg/m²/h) y N₂O (41.3 μg/m²/h) en el ensayo (Figura 3). En este tipo de suelos con alto contenido de arcillas, el establecimiento de AV en el T1 creó un microclima más húmedo en el agroecosistema, que redujo la temperatura del suelo y favoreció la condición

Cuadro 2. Análisis de varianza para las variables involucradas en la emisión de gases con efecto invernadero.

FV	GI	T. suelo		PPA ^a		CO ₂		CH ₄		N ₂ O	
		CM	Pr > F	CM	Pr > F	CM	Pr > F	CM	Pr > F	CM	Pr > F
Bloque	5	0.121	0.087	42.25	0.280	11.70	0.796	24.51	0.51	5.380	0.252
Tratamiento	1	13.80	0.0008**	116.512	0.116 ^{ns}	458.185	0.0084**	2927.50	0.0001**	80.44	0.0032**
Media		24.21		54.27		14.75		20.42		38.70	
CV		0.44		7.47		34.40		24.63		4.37	
R ²		0.99		0.85		0.80		0.96		0.88	

a. porosidad total del suelo.

*= significativo (P<0.05); **= altamente significativo (p<0.01); ns = no significativo.

de anaerobiosis, con efectos sobre la emisión de CH₄ y N₂O. Lo anterior, debido a que al reducirse las concentraciones de oxígeno del ambiente por saturación de los espacios porosos, los microorganismos utilizan como aceptores de electrones al NO₃⁻ y CO₂, entre otros (Delgado, Casella y Bedmar, 2007). Esta tendencia fue similar a la encontrada en otras investigaciones por Escobar (2011) y Ferreira (2008), donde hubo correlación positiva entre la emisión de N₂O y CH₄ con altos valores de PPA (>50%). Por su parte, las altas temperaturas en el T2 generaron incrementos en la mineralización de la MOS, con incrementos notables de emisiones de CO₂ a la atmósfera.

Similares a los resultados de esta investigación sobre algunas variables del suelo, otros autores registran que las bacterias nitrificantes son capaces de mineralizar el N del suelo y liberarlo en formas de NH₄⁺ y NO₃⁻, en condiciones aeróbicas y anaeróbicas, con mayor actividad en el primer horizonte del suelo por su alto contenido de MO en diferentes estados de descomposición (Marschner and Rengel, 2007). Adicionalmente, las concentraciones de NH₄⁺ y NO₃⁻ en el suelo fluctúan según la época del año, la tipología de los cultivos y las prácticas culturales (Castro, 2010; Gallego, 2012).

El sustrato para la producción de NO₃⁻ es el NH₄⁺, de manera que, dependiendo de las condiciones del suelo, las poblaciones de bacterias nitrificantes fluctúan en el tiempo y sus efectos se marcan en los contenidos y disponibilidad de estos elementos para la absorción de los cultivos. En este estudio se pudo observar, que mientras en el AV hubo predominio de NH₄⁺ sobre NO₃⁻, aparen-

temente se asegura la dinámica del N y su disponibilidad para los cultivos, contrastando con el barbecho donde existió predominio de NO₃⁻ sobre el NH₄⁺, reflejando posibles pérdidas de N en el agroecosistema por la alta solubilidad del NO₃⁻, unida a la baja asimilación por la biomasa, con perjuicio sobre el ciclaje en el agroecosistema.

Aporte de nutrientes por la biomasa de los AV

Debido a la importancia de evaluar el aporte de nutrientes al suelo con la práctica de AV, se estimó el contenido de MS, C, N y P en tejidos. El análisis nutricional mostró que hubo aporte de cerca de 4 t MS/ha en el AV, con contenidos cercanos a 1668.3 kg/ha de C, 78.7 kg/ha de N y 11.0 kg/ha de P (Cuadro 3). Las mayores cantidades de nutrimentos los aportó *M. pruriens* L., al facilitar alta mineralización y disponibilidad, debido a su menor relación C/N, comparada con maíz. Frecuentemente, la relación C/N es utilizada para estimar la velocidad de descomposición de residuos vegetales en el suelo, considerándose rápida cuando esta relación fluctúa entre 10 y menos de 20 como corresponde a esta leguminosa, y, lenta, cuando la relación es superior a 30 (Martin y Rivera, 2004; Baligar y Fageria, 2007; Prager *et al.*, 2012).

Por ello, en la práctica de AV se recomienda sembrar mezclas de leguminosas con gramíneas o crucíferas, con el fin de mejorar la relación C/N de los residuos que se incorporan al suelo. En este ensayo, la biomasa de maíz presentó una alta relación C/N (86,7) y *M. pruriens* L. una baja relación C/N (12,6). De acuerdo con Sullivan (2003), las relaciones mayores a 25 hacen que el N sea inmovilizado

Cuadro 3. Análisis foliar de partes de planta de maíz y mucuna en el ensayo.

Especie	Órgano	C	N	P	C	N	P	Relación
		g/kg			Kg/ha			C:N
<i>Zea mays</i> L.	Hojas	392.69	7.66	2.52	795.90	9.18	4.65	86.7
	Tallo	394.55	2.70	2.37				
	Raíz	432.73	4.19	1.41				
<i>Mucuna pruriens</i> L.	Hojas	417.20	48.98	3.40	872.36	69.48	6.33	12.6
	Tallo	390.83	16.16	2.28				
	Raíz	425.35	18.51	2.96				

Laboratorio de Servicios Analíticos del CIAT. 2011.

por los microorganismos del suelo involucrados en la degradación del material vegetal rico en carbono. Sin embargo, para contrarrestar los efectos sobre la rápida descomposición y mineralización de los residuos, se logró una mezcla de residuos al finalizar el ensayo con relación C/N (49,65), que por un lado permite la liberación gradual de nutrientes para subsiguientes cultivos, al tiempo que aporta materia orgánica estable al suelo.

Adicional al aporte nutricional del AV al suelo y, a la utilización de la mezcla en intercultivo *M. pruriens*+ maíz, se obtuvo cosecha de 9.2 ton choclo/ha, 90 días posteriores a la siembra. Estos beneficios adicionales, incentivan la adopción por los productores que lograrían beneficios económicos y ambientales con el uso de estas tecnologías de cultivo. Algunos investigadores, registran que el uso de *M. pruriens* intercalado o en rotación con maíz, aportan al suelo cantidades suficientes de nutrientes para el desarrollo de productividad en granos de la gramínea (Bunch; 1994; Shoko, 2009; Sanclemente y Prager, 2009). Como mecanismos naturales de cooperación en estos sistemas, se resalta la importancia de la acción simbiótica de *M. pruriens* con rizobios y HMA del suelo, que permite el ciclaje de la materia orgánica mediado por la fijación de N₂, la absorción de agua, P y otros nutrientes del suelo, favoreciendo la nutrición del cultivo acompañante (Sánchez de P. *et al.* 2010; Prager *et al.*, 2012).

Este estudio reafirmó lo oportuno y necesario del uso de AV en suelos pobres y/o degradados, ya que aportan cantidades suficientes de MO para restaurar el sistema

y suplir las necesidades de nutrimentos del maíz en sistemas agrícolas de pequeña escala (Bunch, 1994; Sanclemente y Prager, 2009; Gallego *et al.*, 2012; Sanclemente, 2013). Sin embargo, podría considerarse el uso de estas tecnologías en sistemas de mediana y gran escala, en condiciones de fertilidad física, química y biológica alta, con miras de hacer uso más eficiente de los recursos.

Conclusiones

- La adición de materia orgánica como AV (*Mucuna pruriens* L. var. *utilis* + *Zea mays* L.) ó B (*Rottboellia cochinchinensis* L.), tuvo efectos significativos sobre los indicadores utilizados para evaluar la dinámica del N en el suelo: N total (NT), NH₄⁺ y NO₃⁻, número de copias de gen amoA de las bacterias oxidantes de amonio. AV favoreció el equilibrio en la expresión de las fracciones NH₄⁺ y NO₃⁻ y la presencia de bacterias oxidantes del amonio.
- Además del aporte de materia orgánica, factores como la temperatura y la porosidad del suelo en este *Typic Haplustert*, caracterizado por su condición arcillosa, influyeron significativamente sobre la generación de GEI (CO₂, CH₄ y N₂O).
- El uso de la tecnología de AV en mezclas que lleven leguminosas (*Mucuna pruriens* L. var. *utilis*) y gramíneas (*Zea mays* L.), dada su calidad nutricional, además del aporte que hacen al ciclo de nutrientes, permite la ganancia social y económica de producción de alimentos. En este estudio ascendió a 9.6 t/ha de maíz en estado de choclo.

Agradecimientos

Al Grupo de Investigación en Agroecología y Dirección de Investigación de la Universidad Nacional de Colombia, Sede Palmira, quienes financiaron y aportaron los recursos necesarios para esta investigación.

Referencias

- Acosta, R. J.; Aragón, M.; Llanos, Y.; y Madero, E. 1997. Cartografía ultra- detallada de suelos y evaluación de tierras del centro experimental de la Universidad Nacional de Colombia (CEUNP) sede Palmira. *Acta Agronómica* 47:23 - 34.
- Altieri, M. A., Funes, F.; y Petersen, P. 2012. Agroecological efficient agricultural systems for smallholder farmers: contributions to food sovereignty. *En: J. Agron. Sust. Develop.* 32:1 - 13.
- Amézquita, E.; Ashby, J.; Knapp, E. K.; y Thomas, R. 1998. CIAT's strategic research for sustainable land management on the steep hillsides of Latin America. *En: F. T. Penning de Vries, F. Agus y J. Kerr (eds.). Soil erosion at multiple scales: principles and methods for assessing causes and impacts.* Wallingford, Reino Unido, CAB International. p. 121 - 132.
- Baijukya, F.; De Ridder, N.; y Giller, K. 2004. Nitrogen release from decomposing residues of leguminous cover crops and their effect on maize yield on depleted soils of Bukoba District, Tanzania. *J. Plant Soil.* 279:77 - 93.
- Baligar, V. C. y Fageria, N. K. 2007. Agronomy and physiology of tropical cover crops. *J. Plant Nutr.* 30:1287 - 1339.
- Blanchart, E.; Villenave, C.; Viallatoux, A.; Barthès, B.; Girardin, C.; Azontonde, A.; y Feller, C. 2006. Long-term effect of a legume cover crop (*Mucuna pruriens* var. *Utilis*) on the communities of soil macrofauna and nematofauna, under maize cultivation, in southern Benin. *Europ. J. Soil Biol.* 42:136 - 144.
- Bunch, R. 1994. El uso de abonos verdes por agricultores campesinos: lo que hemos aprendido hasta la fecha. Centro de Información de Cultivos de Cobertura (Cidicco). Informe técnico no. 3, segunda edición. p. 8.
- Castro, A. 2010. Dinámica del nitrógeno y fósforo del suelo en el sistema agroforestal Quesungual. Tesis de Doctorado en Ciencias Agropecuarias-Línea de Investigación en Suelos y Aguas. Universidad Nacional de Colombia sede Palmira. p. 127.
- CIAT (Centro Internacional de Agricultura Tropical). 2006. Manual de análisis de suelos y tejido vegetal. Palmira, Colombia. p. 56.
- Clark, A. 2007. Editor. Managing cover crops profitably. Handbook Series Book 9. Third edition. Beltsville, Maryland: Sustainable Agriculture Network. p. 244.
- Cobo, J. G.; Barrios, E.; Kass, D. C.; y Thomas, R. 2002. Nitrogen mineralization and crop uptake from surface-applied leaves of green manure species on a tropical volcanic-ash soil. *Biol. Fertility Soils* 36:87 - 92.
- Cobo, J. C.; Barrios, E.; y Delve, R. 2008. Decomposition and nutrient release from intra-specific mixtures of legume plant materials. *En: J. Comm. Soil Sci. Plant Anal.* 39:616 - 625.
- Davidson, E. A.; David, M. B.; Galloway; J. N. 2012. Exceso de nitrógeno en el medio ambiente de EU: Tendencias, riesgos y soluciones. Sociedad de Ecología de América. *Revista Tópicos en Ecología* 15:19 p.
- Delgado, M. J.; Casella, S.; y Bedmar, E. J. 2007. Denitrification in Rhizobia-Legume Symbiosis. *En: H. Bothe, S. J. Ferguson y W. E. Newton (eds.). Biology of the nitrogen cycle.* Cap. 6. 10 p.
- Escobar, A. L. 2011. Mitiagção das emissões de gases de efeito estufa por sistemas conservacionistas de manejo de solo. Doutorado em Ciência do Solo. Porto Alegre (RS), Brasil. 105 p.
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación). 2008. Informe del Estado del Suelo en el Mundo. Sala de prensa Oficina Principal Roma, Italia.
- Ferreira, O. 2008. Flujos de gases de efecto invernadero, potencial de calentamiento global y evaluación de emergencia del sistema agroforestal Quesungual en el sur de Lempira, Honduras. Tesis de Maestría en Ciencias Agrarias-Línea de Investigación en Suelos. Universidad Nacional de Colombia sede Palmira. 81 p.
- Gallego, J. 2012. Efectos de dos abonos verdes sobre la mineralización del nitrógeno y la dinámica de las bacterias oxidantes del amonio y del nitrito en un ciclo productivo de maíz (*Zea maíz* L). Maestría en Ciencias Agrarias. Universidad Nacional de Colombia sede Palmira, Palmira, Colombia. p. 122.
- Galloway, J. N., Aber, J. D., Erisman, J. W., Seitzinger, S. P. et al. 2003. The nitrogen cascade. *J. Bioscience* 53:341 - 356.
- Giller, K. 2001. Nitrogen fixation in tropical cropping systems. 2nd ed. CAB International. 423 p.
- Glass, A. D. 2003. Nitrogen use efficiency of crop plants: Physiological constraints upon nitrogen absorption. *Crit. Rev. Plant Sci.* 22:453 - 470.
- Marschner, P. y Rengel, Z (eds). 2007. Soil Biology. Nutrient cycling in terrestrial ecosystems. Berlin, Springer-Verlag editors. Chap. 2. 10:37 - 64.

- Martin, G. M. y Rivera, R. 2004. Mineralización del nitrógeno de la *Canavalia ensiformis* L. en un suelo ferralítico rojo de la Habana. *Cultivos Trop.* 25:83 - 88.
- Mcneill, A. y Unkovich, M. 2007. The nitrogen cycle in terrestrial ecosystems. En: Marschner, P y Rengel, Z. (eds.). *Soil Biology. Nutrient cycling in terrestrial ecosystems*. Berlin, Springer-Verlag editors. 10:37 - 64.
- MEA (Millennium Ecosystem Assessment). 2005. *Ecosystems and human well-being: Biodiversity synthesis*. World Resources Institute, Washington, DC.
- Navia, J. F. 2006. Impacto de aportes superficiales de biomasa vegetal de diferente calidad sobre poblaciones de nemátodos, hongos formadores de micorriza arbuscular (HMA) y rizobios en un suelo agrícola de Santander de Quilichao (Departamento del Cauca). Tesis de Doctorado en Ciencias Agropecuarias, Universidad Nacional de Colombia sede Palmira. 136 p.
- Novoa, Y. R.; Pastrana, V. I.; Suarez, P. E.; Espinosa, C. M. et al. 2011. Emisiones de gases de efecto invernadero en tres accesiones de *Brachiaria humidicola* y *Panicum maximum* cultivar Tanzania en el valle medio del Sinú. Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (Corpoica). 12 p.
- Prager, M.; Victoria, J. A.; Sánchez De Prager, M.; Gómez, E. D.; y Zamorano, A. 2001. El suelo y los abonos verdes, una alternativa de manejo ecológico. Universidad Nacional de Colombia, Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural. Cuadernos Ambientales No. 7
- Prager, M., Sanclemente, O. E., Sánchez de Prager, M., Gallego, J. M.; y Ángel, D. I. 2012. Abonos verdes: Tecnología para el manejo agroecológico de los cultivos. Murcia España. *Rev. Agroecología* 7:53 - 62.
- Rao, I. M. 2009. Essential plant nutrients and their functions. Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT). Cali, Colombia. Working Document No. 36.
- Raun, W. R. y Johnson, G. V. 1999. Improving nitrogen use efficiency for cereal production. *Agron. J.* 91:357:363.
- Rockström, J.; Steffen, W.; Noone, K.; y Persson, Å. 2009. Planetary boundaries: exploring the safe operating space for humanity. *Ecol. Soc.* 14:32.
- Sánchez De Prager, M.; Posada, R.; Velásquez, D.; y Narváez, M. 2010. Metodologías básicas para el trabajo con micorriza arbuscular y hongos formadores de micorriza arbuscular. Universidad Nacional de Colombia sed Palmira. 139 p.
- Sánchez, P. A. y Logan, T. J. 1992. Myths and science about the chemistry and fertility of soils in the tropics. En: R. Lal y P. A. Sánchez (eds.). *Myths and science of soils in the tropics*. SSSA Madison, Wisconsin, EE.UU. p. 35 - 46.
- Sanclemente, O. E. y Prager, M. 2009. Efecto del cultivo de cobertura y abono verde, *Mucuna pruriens*, en las algunas propiedades biológicas de un suelo Typic Haplustalfs cultivado con maíz dulce (*Zea mays* L.) en la zona de ladera del municipio de Palmira, Valle del Cauca, Colombia. *Rev. Bras. Agroec.* 4(2): 4133 - 4138.
- Sanclemente, O. E. 2013. Efecto de *Mucuna pruriens* asociada a una gramínea sobre la actividad simbiótica rizosférica y la movilización de N y P, en un sistema de cultivo maíz (*Zea mays* L.)-soya (*Glycine max* L.). Tesis doctoral. Universidad Nacional de Colombia sede Palmira. 123 p.
- Shoko, M. 2009. Exploring phosphorus, mucuna (*Mucuna pruriens*) and nitrogen management options for sustainable maize production in a depleted kaolinitic sandy loam soil of Zimbabwe. Ph.D. Thesis. Faculty of Agricultural and Forestry Sciences. Stellenbosch University. p. 141.
- Subbarao, G. V.; Nakahara, K.; Hurtado, M. P.; Ono, H. et al. 2009. Evidence for biological nitrification inhibition in *Brachiaria* pastures. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. 106:17302 - 17307.
- Sullivan, P. 2003. Overview of cover crops and Green manures; Fundamentals of sustainable agriculture. National Center for Appropriate Technology. Arkansas: July, 2003. p. 1 - 16.
- Woomer, P. L.; Martin, A.; Albretch, A.; Resck, D. V. S.; y Scharpenseel, H. W. 1994. The importance and management of soil organic matter in the tropics. En: P. L. Woomer y M. J. Swift (eds.). *The biological management of tropical soil fertility*. Wiley & Sons and TSBF, Reino Unido. p. 47 - 80.