

LIXIVIACIÓN DEL NITRÓGENO EN ALGUNOS SUELOS DE LA ZONA CAFETERA Y SU RELACIÓN CON LA TEXTURA

Esnéider Arias-Suárez*; Siavosh Sadeghian-Khalajabadi**; Beatriz Mejía-Muñoz**;
Carmen Soledad Morales-Londoño***

RESUMEN

ARIAS S., E.; SADEGHIAN K., S.; MEJÍA M., B.; MORALES L., C.S. Lixiviación del nitrógeno en algunos suelos de la zona cafetera y su relación con la textura. Cenicafé 60 (3): 239-252. 2009

El nitrógeno (N) es el nutriente más limitante en la producción de café en Colombia, por ello la importancia de conocer sus pérdidas en procesos como volatilización, denitrificación, erosión y lixiviación, con el fin de desarrollar estrategias para reducir los costos económicos y ambientales. Mediante el empleo de columnas de lixiviación y riegos periódicos, se evaluaron las pérdidas del N (urea) por lixiviación en cuatro unidades de suelos de la zona cafetera colombiana, diferentes en su textura, origen y mineralogía: San Simón (Eutropept, franco-arenosa), Montenegro (Fulvudands, franco-arenosa), Chinchiná (Melanudands, franca) y Doscientos (Dystropept, franco-arcillosa). La fracción amoniacal lixiviada (N-NH_4^+) fue mayor que la nítrica (N-NO_3^-), resultado que se relacionó con un exceso en el contenido de humedad en las columnas. Las pérdidas totales de N ($\text{N-NH}_4^+ + \text{N-NO}_3^-$) fueron equivalentes al 33% de la cantidad aplicada en la unidad San Simón, 42% en Montenegro, 36% en Chinchiná y 23% en Doscientos, éstas antes que a la textura, se asociaron con otras características del suelo como mineralogía, contenido de materia orgánica, pH y actividad microbiológica. Durante los primeros riegos se incrementó el pH de la solución, debido a la hidrólisis de la urea, para luego descender en respuesta a la nitrificación. En las unidades San Simón, Montenegro y Doscientos hubo mayores pérdidas de K^+ , Ca^{2+} y Mg^{2+} por la fertilización con urea.

Palabras claves: Urea, nitrato, amonio, bases intercambiables, acidez.

ABSTRACT

Nitrogen (N) is the most limiting nutrient in the coffee production in Colombia. Hence, the importance of knowing its losses in processes such as volatilization, denitrification, erosion and leaching in order to develop strategies to reduce economic and environmental costs. Through the use of leaching columns and periodic irrigations, the N losses (urea) by leaching were assessed in four soil units of the Colombian coffee-growing region, different in texture, origin and mineralogy: San Simon (Eutropept, sandy-loam), Montenegro (Fulvudands, sandy-loam), Chinchiná (Melanudands, loam) and Doscientos (Dystropept, clay-loam). The ammonia leach fraction (N-NH_4^+) was higher than the nitrate one (N-NO_3^-), result that was related to high moisture in the columns. Total N losses ($\text{N-NH}_4^+ + \text{N-NO}_3^-$) were equivalent to 33 % of the amount applied in the San Simón unit, 42 % in Montenegro, 36 % in Chinchiná, and 23 % in Doscientos. They were rather associated with other soil characteristics such as mineralogy, organic matter content, pH and microbiology activity than to texture. During the first irrigation, the pH of the solution increased due to the urea hydrolysis, and then it decreased in response to nitrification. In the San Simon, Montenegro and Doscientos units, there were higher losses of K^+ , Ca^{2+} and Mg^{2+} by the urea fertilization.

Keywords: Urea, nitrate, ammonia, exchangeable bases, acidity.

* Ingeniero Agrónomo, Universidad de Caldas, Colombia.

** Investigador Científico II y Asistente de Investigación, respectivamente. Suelos. Centro Nacional de Investigaciones de Café. Cenicafé. Chinchiná, Caldas, Colombia.

*** Profesor Fertilidad de Suelos, Facultad de Ciencias Agropecuarias, Universidad de Caldas.

MATERIALES Y MÉTODOS

El nitrógeno (N) se caracteriza por ser el nutriente más limitante en la producción de café en Colombia (29). En el suelo se halla básicamente asociado a la materia orgánica, y sólo una fracción se encuentra en diversas formas inorgánicas (N_2O , NO , NH_3 , NO_2^- , NH_4^+ y NO_3^-), de las cuales el amonio y el nitrato son aprovechables por las plantas (36).

Resultados obtenidos bajo diferentes condiciones agrícolas demuestran que los cultivos raramente utilizan más del 50% del N aplicado (34, 3), el resto permanece en el suelo, disponible para los siguientes cultivos, o queda susceptible a pérdidas a través de procesos como la volatilización, denitrificación, erosión y lixiviación por fuera de la zona radical (32, 36).

En cuanto a la lixiviación se refiere, las pérdidas de N han sido relacionadas con propiedades del suelo como la textura, el contenido de arcilla y el tipo de mineral secundario predominante. En este sentido, algunos autores reportan mayores pérdidas de este elemento para suelos con textura arenosa (39, 6, 31), o con una baja capacidad de los suelos con predominio de alófana para retener el $N-NH_4^+$ (16, 2). En contraposición, Visconti y Criollo (35) consideran que la textura no afecta dichas pérdidas.

Dado que para la zona cafetera colombiana, caracterizada por su diversidad de suelos, es escasa la información sobre el efecto de la textura en las pérdidas por lixiviación del N que se aplica vía fertilización, se propuso evaluar dicho proceso como parte fundamental dentro de la búsqueda de mayor eficiencia en el uso de la urea, principal fuente simple de N empleada en la caficultura colombiana.

Esta investigación se realizó durante los meses de marzo y octubre de 2007, en el Centro Nacional de Investigaciones de Café, Cenicafé. Se empleó la técnica de columnas de lixiviación, con el fin de determinar las pérdidas de N; para ello, se seleccionaron cuatro unidades cartográficas de suelo, representativas de la zona cafetera colombiana, diferentes en su textura, mineralogía y propiedades químicas (Tablas 1 y 2).

En cada unidad de suelo se seleccionó un lote de café tecnificado, establecido en alta densidad de siembra (entre 5.000 y 10.000 plantas/ha) con variedad Colombia o Caturra. También se tuvo como requisito que en la plantación no se hubieran realizado labores de fertilización cuatro meses antes del muestreo.

En el centro de cada lote se tomaron 14 muestras de suelo sin disturbar, de los primeros 25 cm del perfil, con el suelo húmedo y en el área correspondiente a la gotera del árbol, para ello se emplearon cilindros de PVC de 30 cm de largo y 10,2 cm de diámetro (Figura 1). Adicionalmente, se recolectaron muestras de suelo para determinar el contenido de arenas, limos y arcillas por el método de la pipeta (7), densidad aparente con cilindro (18) y las siguientes propiedades químicas, de acuerdo a las metodologías descritas por Carrillo (4): pH (método potenciométrico- relación suelo:agua desionizada 1:1 p/p), capacidad de intercambio catiónico-CIC (Acetato de amonio 1N, pH 7,0, y determinación por colorimetría con reactivo de Nessler), materia orgánica (método Walkley-Black y valoración por colorimetría a 585 nm), N total (Kjeldahl), K, Ca y Mg (extracción con acetato de amonio 1 N a pH 7,0 y lectura por espectrofotometría de absorción atómica), y Al (extracción con KCl

Tabla 1. Localización, material de origen y clasificación taxonómica de los suelos objetivo del estudio.

Municipio	Departamento	Material parental	Clasificación taxonómica	Unidad de suelo
Ibagué	Tolima	Granito biotítico	Eutropept	San Simón
Buenavista	Quindío	Ceniza volcánica	Fulvudands	Montenegro
Chinchiná	Caldas	Ceniza volcánica	Melanudands	Chinchiná
Sevilla	Valle del Cauca	Basalto	Dystropept	Doscientos

Tabla 2. Propiedades físicas, químicas y mineralógicas de las unidades de suelo seleccionadas.

Características del suelo ¹	San Simón	Montenegro	Chinchiná	Doscientos
Físicas				
Contenido de arena (%)	59	55	40	22
Contenido de limo (%)	26	29	43	48
Contenido de arcilla (%)	15	16	16	30
Clasificación textural ²	FA	F	F	FAR
Densidad aparente (g.cm ⁻³)	1,21	0,92	0,65	0,95
Conductividad hidráulica (cm.min ⁻¹)	0,13	0,28	0,05	0,08
Químicas				
pH	5,10	4,80	4,60	5,30
CIC (cmol _c .kg ⁻¹)	9,00	16,00	27,00	24,00
Materia orgánica (%)	5,10	5,20	13,40	5,50
Nitrógeno total (g.kg ⁻¹)	2,50	3,70	5,20	3,10
Potasio (cmol _c .kg ⁻¹)	0,16	0,34	0,11	1,28
Calcio (cmol _c .kg ⁻¹)	3,80	1,70	0,60	7,30
Magnesio (cmol _c .kg ⁻¹)	1,40	0,30	0,20	6,00
Aluminio (cmol _c .kg ⁻¹)	0,40	1,70	2,40	0,40
Mineralógicas				
Material amorfo (%)	5-15	30-50	>50	5-15
Clorita (%)	-	-	-	15-30
Metahalosita (%)	30-50	-	-	5-15
Vermiculita (%)	15-30	-	-	-
Micas (%)	-	-	-	<5
Feldespatos (%)	<5	<5	-	-

¹Información correspondiente a los primeros 12,5 cm de profundidad.

²FA: Franco-arenosa; F: Franco; FAR: Franco-arcillosa.

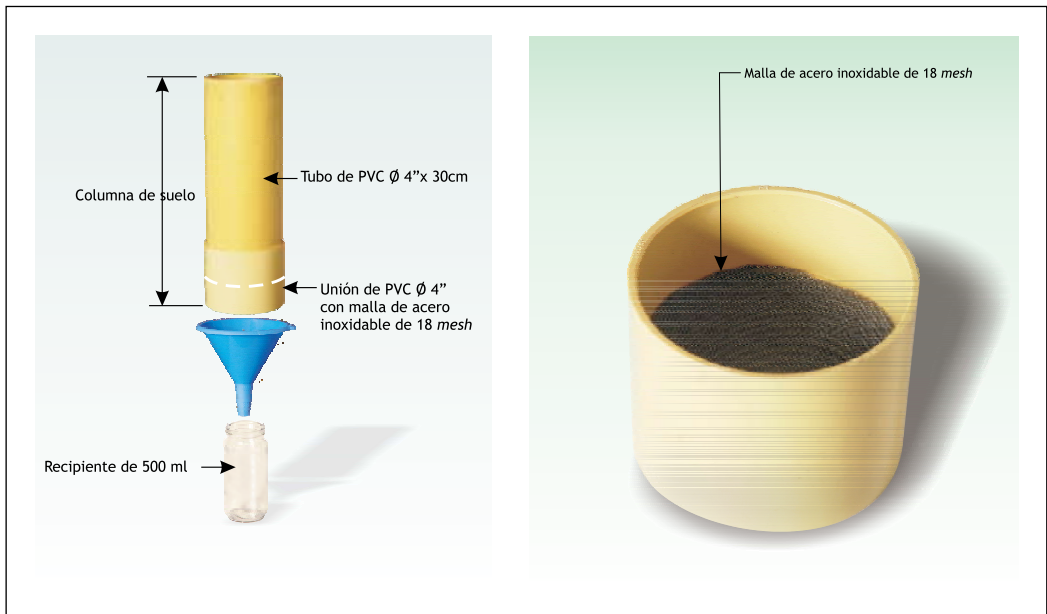


Figura 1. Detalles sobre la columna de lixiviación.

1 N y valoración por espectrofotometría de absorción atómica). El análisis mineralógico se realizó por difracción de rayos X de la fracción arcillosa (<math><2 \mu\text{m}</math>), polvo y material en partículas.

En el laboratorio, las columnas se ubicaron sobre un soporte de madera y recibieron riego hasta lograr la capacidad de campo. Luego, la mitad de las muestras de cada unidad de suelo se fertilizaron con 3,68 g de N (8,0 g de Urea), cantidad que se aplicó superficialmente; la otra mitad no recibió aportes de N. En total, se contó con 56 columnas, resultantes de 4 unidades de suelo x 2 modalidades (con y sin aplicaciones de N) x 7 repeticiones, dispuestas bajo el diseño estadístico completamente aleatorio.

Una vez aplicada la Urea, a cada columna se aplicaron 360 mL de agua destilada, en seis aplicaciones de 60 mL cada 30 minutos; este procedimiento se repitió cada cuatro días,

en 25 ocasiones. La cantidad total de agua adicionada en cada columna fue equivalente a 1.100 mm, y representa el 44 % del promedio de lluvia anual que ocurre en La Granja de Cenicafé (13). Durante las horas siguientes a la irrigación, se colectó la solución lixiviada en frascos de vidrio acoplados al sistema de drenaje de las columnas, para determinar su volumen y pH. Posteriormente, se tomó una alícuota de esta solución, se transvasó a un recipiente plástico y se almacenó a 4 °C, para cuantificar las concentraciones de N-NH_4^+ , N-NO_3^- (destilación con óxido de magnesio y aleación de Devarda, respectivamente), K^+ , Ca^{2+} y Mg^{2+} (espectrofotometría de absorción atómica).

Después del último lavado, se extrajo el suelo contenido en cuatro de las siete columnas de cada tratamiento, con el fin de analizar pH, CIC, N-NH_4^+ , N-NO_3^- , K^+ , Ca^{2+} y Mg^{2+} , a las profundidades de 0 a 12,5 cm y de 12,5 a 25 cm.

Se realizó un análisis de varianza al 5%, bajo el modelo del diseño experimental aplicado. Las pérdidas totales por lixiviación de $N-NH_4^+$, $N-NO_3^-$ y N -total ($N-NH_4^+ + N-NO_3^-$) entre unidades de suelo se compararon con la prueba Tukey al 5%, y las de K^+ , Ca^{2+} y Mg^{2+} entre modalidades con la prueba t al 5%. Además, se compararon los promedios de N , $N-NH_4^+$, $N-NO_3^-$, pH, CIC y bases intercambiables en el suelo entre modalidades con la prueba t al 5%.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

N lixiviado. Las cantidades lixiviadas de $N-NH_4^+$ fueron equivalentes al 20% del N total aplicado como urea en la unidad San Simón, 30% en Montenegro, 26% en Chinchiná y 12% en la unidad Doscientos. Éstas se incrementaron en los primeros días después de la fertilización, para luego descender hasta niveles cercanos a los iniciales. En contraste, las pérdidas de $N-NO_3^-$ fueron 13%, 12%, 11% y 10% para las unidades San Simón, Montenegro, Doscientos y Chinchiná, respectivamente, y aumentaron conforme a los riegos, pero fueron

menores que la fracción amoniacal (Figura 2). Paramasivam y Alva (23), al emplear columnas de lixiviación, registraron mayores pérdidas de $N-NH_4^+$ en los dos primeros riegos y luego disminuyeron gradualmente, comportamiento que relacionaron con posibles pérdidas de NH_3 por volatilización y a la transformación del $N-NH_4^+$ a $N-NO_3^-$ por nitrificación.

Las mayores pérdidas de $N-NH_4^+$ después de la fertilización nitrogenada sugieren que la urea se hidrolizó a $N-NH_4^+$ como respuesta al incremento de la actividad de la enzima ureasa, y el aumento gradual de la cantidad de $N-NO_3^-$ en el agua lixiviada estuvo relacionado con la nitrificación. Araujo *et al.* (1) señalan que la transformación de la urea a $N-NO_3^-$ puede ocurrir en un lapso de una semana después de la fertilización, y Nkrumah *et al.* (19) reportan que la hidrólisis a $N-NH_4^+$ es un proceso que ocurre entre tres y siete horas después de aplicar el fertilizante.

Se hubiera esperado una mayor lixiviación de $N-NO_3^-$ que de $N-NH_4^+$, dada su naturaleza aniónica y menor retención en el complejo

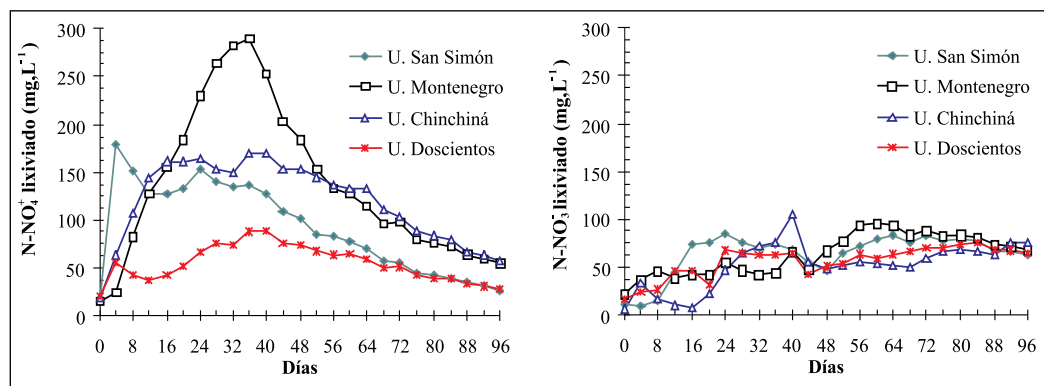


Figura 2. Concentraciones de $N-NH_4^+$ y el $N-NO_3^-$ en el agua de lixiviación después de la fertilización (Frecuencia de riego: cada 4 días).

de cambio. El anterior comportamiento indica una baja actividad microbiológica involucrada en el proceso de la nitrificación del amonio; posiblemente debido a un exceso de humedad en el suelo y la subsecuente reducción en la concentración de oxígeno. Misra *et al.* (17), al trabajar con columnas de lixiviación, encontraron que concentraciones de oxígeno en el suelo superiores al 5% aceleraron la nitrificación, mientras que ésta se inhibió completamente en ausencia de oxígeno molecular.

La menor pérdida de $N-NO_3^-$ también puede asociarse con la adsorción preferencial de este anión por las cargas positivas de los coloides en el suelo (15), y a la presencia de minerales amorfos y óxidos de Fe y Al (25).

Las mayores pérdidas de N (principalmente, $N-NH_4^+$), sobre todo en las unidades Montenegro y Chinchiná, pueden estar relacionadas con el tipo de arcillas predominantes (Tabla 2), puesto que el poder de fijación del NH_4^+ es casi nulo en materiales amorfos como la alófana (16, 2), es bajo en arcillas 1:1 como la metahalosita y la caolinita (32, 2), y mayor en las arcillas 2:1, especialmente la vermiculita (16, 10, 32, 2). En estas circunstancias, es posible que la mayor cantidad lixiviada de $N-NH_4^+$ en las unidades Montenegro y Chinchiná esté relacionada con su contenido de alófana (> 30%), lo cual indica que estos suelos tienen menor capacidad para fijar NH_4^+ ; y en la unidad San Simón, a pesar de tener bajos contenidos de arcilla (13%-15%), la presencia de vermiculita (15%-30%) en esta fracción puede tener influencia en la retención de este catión.

Las pérdidas totales de N ($N-NH_4^+ + N-NO_3^-$) alcanzaron valores equivalentes al 33% de la cantidad de urea aplicada en la unidad San Simón, 42% en Montenegro, 36 % en Chinchiná y 23% en Doscientos

(Figura 3). Éstas no se estabilizaron después de 25 riegos, lo cual puede atribuirse a la retención del N por el suelo o por los microorganismos, y a la denitrificación o volatilización, esta última favorecida por el aumento del pH en los primeros días (incrementos entre 0,8 y 2,5 unidades). Leal *et al.* (14) registraron pérdidas por volatilización de N que alcanzaron el 35% en la unidad Montenegro y el 30% en la unidad Chinchiná, después de 20 días de aplicar urea al suelo. Además, es probable que hubieran ocurrido pérdidas de N como urea antes de darse el proceso de hidrólisis a $N-NH_4^+$, pues al respecto Zhou *et al.* (39) al trabajar con columnas de lixiviación, demostraron que cuando se aplicó urea, entre 78% y 84% del N lixiviado es urea solubilizada. Además, los resultados presentados por estos investigadores indican que este fertilizante se movió rápidamente a través del suelo después de ser aplicado.

Varios trabajos con columnas de lixiviación concluyen que en los suelos de textura

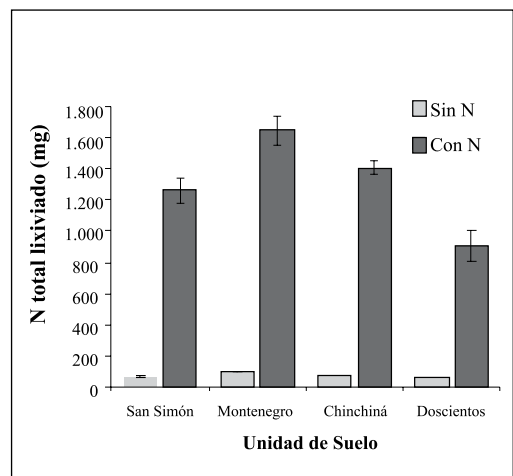


Figura 3. Pérdidas totales de N por lixiviación, en cuatro unidades de suelos de la zona cafetera, con y sin aplicación de urea. Las barras indican error de estimación.

arenosa se presentan las mayores pérdidas de N (6, 31, 39); sin embargo, los resultados obtenidos demuestran que en las unidades de suelo evaluadas, las pérdidas de N-NH_4^+ y N-NO_3^- no dependieron del contenido de arena, y que otras características como el pH, el contenido de humedad, la actividad microbiológica y la mineralogía del suelo pueden contribuir al incremento de las pérdidas por lixiviación del elemento cuando se aplica urea. Además, surge la necesidad de realizar estudios que evalúen el fraccionamiento del nitrógeno aplicado al café en suelos de las unidades Montenegro y Chinchiná, pues es posible que en estas dos unidades de suelos se presenten mayores pérdidas de N por lixiviación cuando se utiliza urea como fuente fertilizante.

pH de la solución y pérdida de bases intercambiables. El pH de la solución lixiviada presentó una variación entre 3,9 y 8,1, comportamiento que se caracterizó por un rápido incremento en los niveles de pH después de la fertilización, seguido por un descenso gradual en los eventos de lixiviación posteriores al segundo riego (Figura 4). El incremento inicial del pH se debe a la formación de HCO_3^- durante la hidrólisis de la urea (37); en este mismo sentido, el

descenso en el pH de la solución se asocia a la nitrificación del amonio proveniente de la urea, pues durante este proceso se liberan dos iones H^+ por cada mol de NH_4^+ oxidado (10, 38). Además, Pavan *et al.* (24) sostienen que el descenso del pH en el suelo es el resultado de un excedente de iones H^+ de la nitrificación, que no es neutralizado por la liberación de iones OH^- en el proceso de absorción de NO_3^- por las raíces de las plantas. Cambios similares en el pH del suelo por la aplicación de urea han sido reportados por Paramasivam y Alva (23) y Sadeghian *et al.* (30).

El aumento inicial del pH durante la hidrólisis de la urea pudo generar pérdidas de sustancias húmicas por lixiviación, debido a que estas sustancias se solubilizan en medios alcalinos (32). Aunque no se determinó el contenido de carbono (C) en el agua drenada de los suelos estudiados, se observaron coloraciones oscuras en el lixiviado, en los primeros 48 días después de la fertilización con urea (Figura 5). Lo anterior, sugiere que las aplicaciones de urea incrementan las pérdidas de sustancias húmicas por lixiviación, principalmente en suelos con altos contenidos de materia orgánica como los de la unidad Chinchiná.

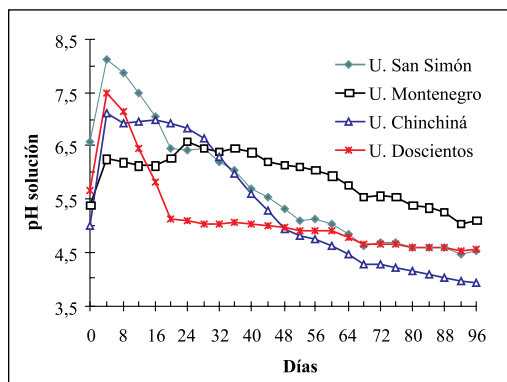


Figura 4. Cambios en el pH de la solución lixiviada por la aplicación de nitrógeno.

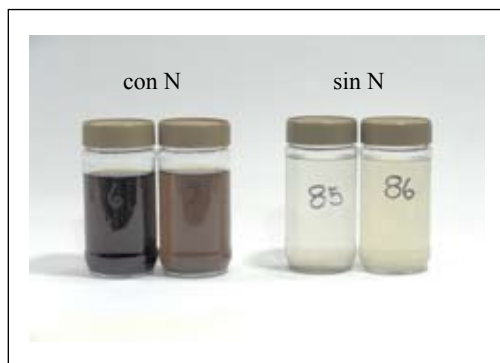


Figura 5. Coloración oscura en el agua lixiviada por efecto de la fertilización con urea.

También es posible que este incremento en el pH aumentara las pérdidas de N por volatilización, como NH_3 , favorecido por la alta concentración de N-NH_4^+ en el suelo. He *et al.* (11) encontraron en suelos arenosos que las pérdidas de N por volatilización fueron mínimas a pH 3,5 y aumentaron con el incremento del pH en el suelo hasta 8,5.

Las pérdidas totales de las bases intercambiables K^+ , Ca^{2+} y Mg^{2+} se incrementaron por la fertilización nitrogenada en las unidades San Simón, Montenegro y Doscientos (prueba t al 5%) (Figura 6), tendencia que coincide con lo registrado por Sadeghian (27). Para suelos cafeteros de Costa Rica, Rojas *et al.* (26) también registraron incrementos en la pérdida de K, al aumentar la dosis de N, cuando se empleó como fuente nitrato de amonio. Los resultados en referencia pueden relacionarse con el desplazamiento de las bases del complejo de cambio por otros cationes como H^+ y NH_4^+ , producidos en la hidrólisis de la urea y la nitrificación, respectivamente; además, el NO_3^- presente en la solución del suelo es capaz de formar enlaces con K^+ , Ca^{2+} y Mg^{2+} , haciéndolos más susceptibles a pérdidas por lavado. Este comportamiento

también ha sido observado en otros estudios de lixiviación realizados (21, 22, 33).

En contraposición a lo anterior, en la unidad Chinchiná las pérdidas totales de Ca^{2+} y Mg^{2+} disminuyeron con la fertilización nitrogenada, posiblemente debido al aumento del pH de la solución (Figura 7), fenómeno que aumentaría la CIC en este suelo, caracterizado por sus altos contenidos de alófana (> 50%) y de materia orgánica (> 9,6%).

Para los suelos de las unidades San Simón y Doscientos, las cantidades totales de Ca^{2+} y Mg^{2+} lixiviados fueron mayores que en las demás unidades cuando se aplicó urea, respuesta que se puede relacionar con los niveles más altos de estos elementos en el suelo. Lo anterior no ocurrió para el caso del K^+ , pues en las dos unidades derivadas de cenizas volcánicas, en especial Montenegro, sus pérdidas fueron mayores que en el Mg^{2+} , e incluso superiores al Ca^{2+} . Aunque Henao (12) señala que la unidad Montenegro presenta una relativa retención selectiva más alta de K^+ que la unidad Chinchiná, su alto contenido de K asociado a la presencia de muscovita en la matriz de este suelo (9) y a la mayor conductividad

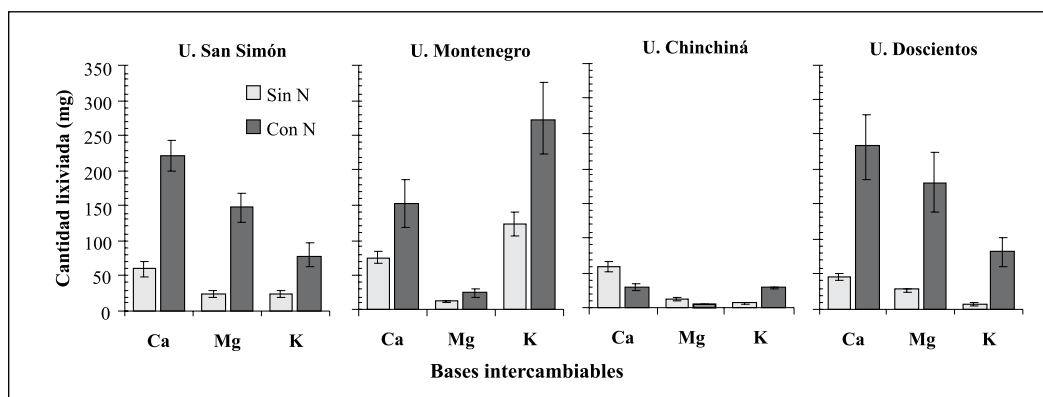


Figura 6. Pérdidas totales de Ca^{2+} , Mg^{2+} y K^+ por lixiviación en cuatro unidades de suelo de la zona cafetera de Colombia, con y sin aplicación de urea. Las barras indican el error de estimación.

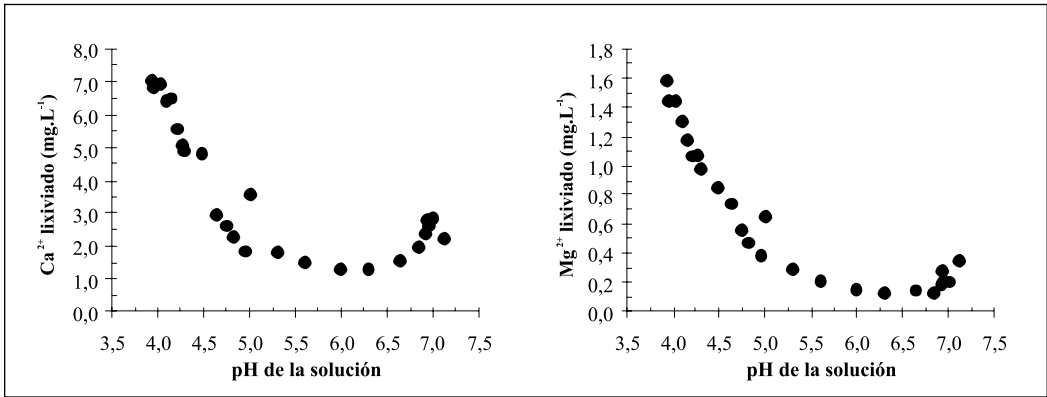


Figura 7. Relación entre el pH de la solución lixiviada y las pérdidas de Ca²⁺ y Mg²⁺ por lixiviación, en el suelo de la unidad Chinchiná.

hidráulica, pudieron incidir en el incremento de las pérdidas de este elemento presente en la solución del suelo.

Contenido de N y propiedades químicas en el suelo. En los primeros 12,5 cm hubo un incremento significativo en el contenido de N-NO₃⁻ en el suelo de las unidades Chinchiná y Doscientos (Figura 8), y de 12,5 a 25,0 cm aumentó la concentración de N-NH₄⁺ y N-NO₃⁻ en las unidades San Simón y Chinchiná, en la unidad Montenegro aumentó el N-NO₃⁻, y en la unidad Doscientos el N-NH₄⁺. Este comportamiento estaría relacionado con la alta variabilidad que pueden presentar el N-NH₄⁺ y el N-NO₃⁻ en el suelo, tal como lo demuestra un estudio realizado por Ochoa *et al.* (20); no obstante, este elemento tendió a acumularse en la capa más profunda.

En general, el N amoniacal fue mayor que el nítrico en las dos modalidades (con y sin aplicación de N), especialmente de 12,5 a 25,0 cm de profundidad. Como se mencionó anteriormente, esta tendencia no es común en suelos bien aireados, donde el NO₃⁻ es la forma más abundante, mientras el NH₄⁺ domina en suelos donde la nitrificación es inhibida (36).

La aplicación de N y la subsecuente lixiviación de las bases intercambiables tendieron parcialmente a acidificar el suelo (Tabla 5), con valores del pH por debajo del nivel inicial en las unidades San Simón, Chinchiná y Doscientos. El pH en los primeros 12,5 cm bajó entre 0,3 y 0,6 unidades, cambios que fueron significativos en las unidades San Simón, Chinchiná y Doscientos; mientras que en la segunda profundidad evaluada no se registró efecto de los tratamientos. Sadeghian (27) registró una tendencia similar en suelos de la zona cafetera, encontrando que la fertilización con urea ocasionó una disminución del pH en 0,29 unidades. Así mismo, en otro estudio Sadeghian (28) reporta aumentos en la acidez, incrementos del Al intercambiable y, la subsecuente pérdida de Ca²⁺, Mg²⁺ y K⁺ conforme aumentó la dosis de N aplicado, desde 0 hasta 300.kg.ha⁻¹, en ocho localidades de la zona cafetera colombiana.

La CIC no presentó variaciones por la fertilización con N, pese a la reducción del pH en las cuatro unidades de suelo; resultados que difieren a los mostrados por Stumple y Vlek (33), quienes encontraron una reducción de la CIC, producto de un menor número en las cargas dependientes del pH, ocasionado

Tabla 5. Efecto de la fertilización nitrogenada sobre el pH, la CIC y las bases intercambiables en las cuatro unidades de suelo.

Unidad de suelo	Profundidad (cm)	Modalidad	pH	CIC K ⁺ Ca ²⁺ Mg ²⁺							
				----- cmol _c kg ⁻¹ -----							
San Simón	0-12,5	Sin N	5,0 a	9,0 a	0,17 a	2,38 a	1,04 a				
		Con N	4,4 b	9,3 a	0,15 a	2,35 a	0,94 a				
	12,5-25	Sin N	5,2 a	8,3 a	0,12 a	2,65 a	1,14 a				
		Con N	5,0 a	8,5 a	0,12 a	3,50 a	1,53 a				
Montenegro	0-12,5	Sin N	4,9 a	15,8 a	0,22 a	1,80 a	0,41 a				
		Con N	4,8 a	16,8 a	0,17 a	2,80 a	0,45 a				
	12,5-25	Sin N	5,2 a	14,5 a	0,33 a	2,13 a	0,36 a				
		Con N	5,1 a	13,0 a	0,23 a	2,25 a	0,30 a				
Chinchiná	0-12,5	Sin N	4,6 a	25,3 a	0,09 a	0,35 a	0,15 a				
		Con N	4,3 b	25,8 a	0,06 b	0,38 a	0,13 a				
	12,5-25	Sin N	4,6 a	21,3 a	0,05 a	0,15 a	0,07 b				
		Con N	4,5 a	19,8 a	0,07 a	0,28 a	0,14 a				
Doscientos	0-12,5	Sin N	5,2 a	18,8 a	0,85 a	4,78 a	3,24 a				
		Con N	4,6 b	21,5 a	0,71 a	6,10 a	4,05 a				
	12,5-25	Sin N	5,5 a	19,3 a	0,28 a	4,58 a	3,11 a				
		Con N	5,2 a	19,3 a	0,36 a	7,23 a	5,27 a				

Letras no comunes indican diferencias entre modalidades en una misma unidad de suelo y profundidad, según prueba t al 5 %

por la acidificación del suelo. Lo anterior, puede estar relacionado con el método de determinación de esta propiedad química en la que se utiliza el acetato de amonio con pH=7,0, que tiende a sobrevalorar la CIC en suelos, con predominio de cargas variables (dependientes del pH), como los de las unidades Chinchiná y Montenegro. Por lo tanto, Gillman y Fox (8) y Fiantis *et al.* (5) sugieren emplear cloruro de bario en suelos que presentan este tipo de cargas en la fracción coloidal.

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan sus agradecimientos a todas las personas que ayudaron al desarrollo de esta investigación, en especial a los caficultores Leonidas Guzmán en el municipio de Ibagué, y Alejandro Arias Arboleda en el municipio de Sevilla. A los Comités Municipales de Cafeteros de Sevilla e Ibagué, y especialmente a los Ingenieros Alejandro Patiño y Carlos Julio Ramírez. A los auxiliares del laboratorio de la Disciplina

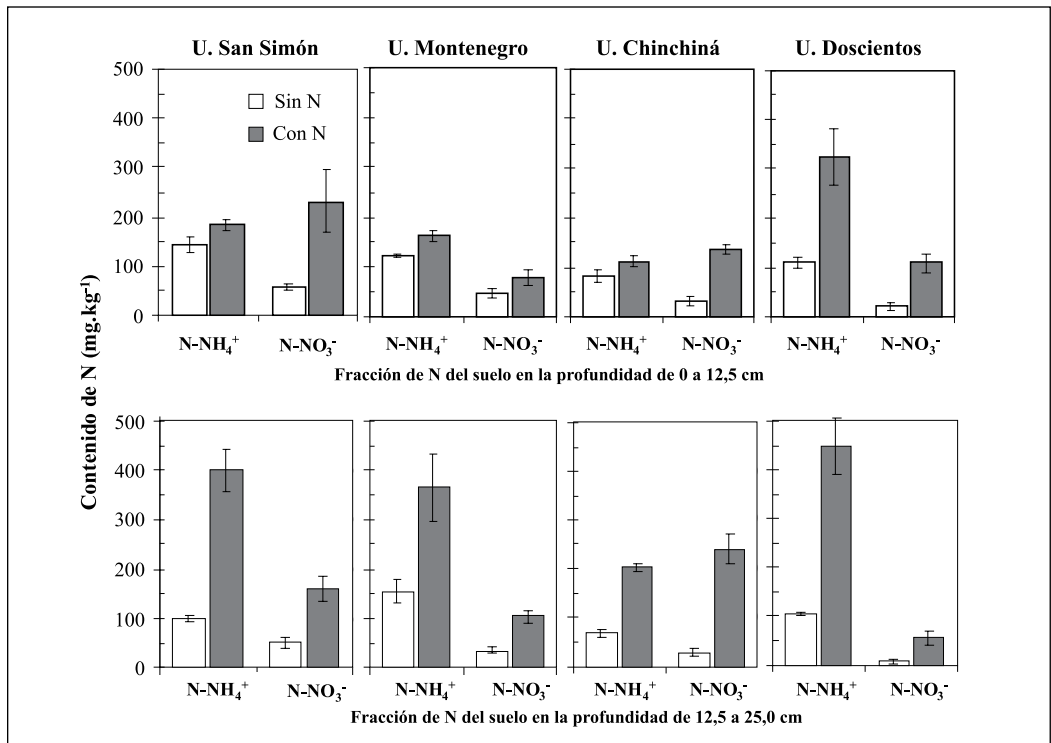


Figura 8. Contenido N-NH₄⁺ y N-NO₃⁻ en dos profundidades, correspondientes a cuatro unidades de suelo de la zona cafetera, después de la fertilización con urea. Las barras indican el error de estimación.

de Suelos Lady Vargas G. y Diego Arcila V.; al señor Carlos Bedoya; a la Dra. Esther C. Montoya R.; a los Ingenieros Édgar Hincapié G., Alveiro Salamanca J., Hernán González O. y Luis F. Salazar G.; al personal de la Estación Central Naranjal y de la Subestación Experimental Paraguaicito, y al personal de Multilab Agroanalítica.

LITERATURA CITADA

1. ARAUJO, A.R.; NUNES C., J.L.; GUIMARÃES G., L.R.; CURI, N.; MARQUES, J.J. Movimentação de nitrato e amônio em columnas de solo. Cienc. Agrotec. 28(3): 537-541. 2004.
2. BAJWA, M. Effect of soil clay mineralogy on the efficiency of ammonium sulfate in flooded rice. Fertilizer Research 5(3): 281-284. 1982.
3. BUSTAMANTE, C.; OCHOA, M.; RODRÍGUEZ, M.I. Balance of three nitrogen ¹⁵N fertilizers in a Cuban oxisol cultivated with *Coffea arabica* L. Tropicultura, 15: 169-172. 1997.
4. CARRILLO P., I.F. Manual de laboratorio de suelos. Chinchiná, Cenicafé, 1985. 111 p.
5. FIANTIS, D.; VAN RANST, E.; SHAMSHUDDIN, J.; FAUZIAH, I.; ZAUYAH, S. Effect of calcium silicate and superphosphate application on surface charge properties of volcanic soils from West Sumatra, Indonesia. Communications in Soil Science and Plant Analysis 33(11-12): 1887-1900. 2002.
6. GAINES, T.P.; GAINES, S.T. Soil texture effect on nitrate leaching in soil percolates. Communications in Soil Science and Plant Analysis 25(13-14): 2561-2570. 1994.
7. GEE, G.W.; BAUDER, J.W. Particle-size analysis. In: KLUTE, A. Ed. Methods of soil analysis,

- Part I: Physical and mineralogical methods, 2. Madison, Wisconsin USA, American Society of Agronomy-Soil Science Society of America, 1986. p. 383-408.
8. GILLMAN, G.P.; FOX, R.L. Increases in the cation exchange capacity of variable charge soils following superphosphate applications. *Soil Science Society of America Journal* 44(5): 934-938. 1980.
 9. GONZÁLEZ O., H.; SALAMANCA J., A. Unidades de suelos representativas de la zona cafetera colombiana. Chinchiná, Cenicafé, 2008. 25 p.
 10. HAVLIN, J.L.; BEATON, J.D.; TISDALE, S.L.; NELSON, W.L. *Soil fertilizer and fertilizers: An introduction to nutrient management*. Estados Unidos: Prentice Hall, 6 ed, 1999. 499p.
 11. HE, Z.L.; ALVA, A.K.; CALVERT, D.V.; BANKS, D.J. Ammonia volatilization from different fertilizer sources and effects of temperature and soil pH. *Soil Science* 164(10): 750-758. 1999.
 12. HENAOT, M.C. Dynamique d'éléments fertilisants dans des sols dérivés de cendres volcaniques de la zone cafetière centrale de Colombie, sous culture de bananier plantain. Louvain (Belgique), Université Catholique de Louvain, 2002. Colación: 239 p. (Tesis: Docteur en Sciences Agronomiques et Ingénierie Biologique).
 13. JARAMILLO R., A. *Clima andino y café en Colombia*. Chinchiná, Colombia: Cenicafé. 2005. 99 p.
 14. LEAL V., L.A.; SALAMANCA J., A.; SADEGHIAN K., S. Pérdidas de nitrógeno por volatilización en cafetales en etapa productiva. *Cenicafé* 58(3): 216-226. 2007.
 15. LESSA, A.S.N.; ANDERSON, D.W. Laboratory estimation of nutrient losses by leaching on an oxisol from Brazil. *Tropical Agriculture* 73(2): 100-107. 1996.
 16. LONGERI S., L.; VIDAL P., I.; FERNÁNDEZ D., M. Fijación de amonio en seis suelos de la VIII Región de Chile. *Agricultura Técnica* 61(2): 180-191. 2001.
 17. MISRA, C.; NIELSEN, D.R.; BIGGAR, J.W. Nitrogen transformations in soil during leaching: II. Steady state nitrification and nitrate reduction. *Soil Science Society of America Proceedings*, 38(2): 294-299. 1974.
 18. MONTENEGRO G., H.; MALAGÓN C., D. *Propiedades físicas de los suelos*. Bogotá. D.E, Sección Imprenta y Ediciones IGAC, 1990. 813 p.
 19. NKRUMAH, M.; GRIFFITH, S.M.; AHMAD, N. Lysimeter and field studies on 15N in a tropical soil. II. Transformation of (NH₂)₂ CO-15N in a tropical loam in lysimeter and field plots. *Plant and Soil* 114: 13-18. 1989.
 20. OCHOA M., W.A.; SUÁREZ V., S.; SADEGHIAN K., S. Variabilidad espacial del Nitrógeno disponible en andisoles de la zona cafetera colombiana. *Cenicafé* 54(2):179-189. 2003.
 21. PHILLIPS, I.R.; BLACK, A.S.; CAMERON, K.C. Effect of cation Exchange on the distribution and movement of cations in soils with variable charge. II. Effect of lime or phosphate on potassium and magnesium leaching. *Fertilizer Research* 17: 31-46. 1988.
 22. PHILLIPS, I.R.; BURTON, E. Nutrient leaching in undisturbed cores of an acidic sandy Podsol following simultaneous potassium chloride and di-ammonium phosphate application. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 73(1): 1-14. 2005.
 23. PARAMASIVAM, S.; ALVA, A.K. Leaching of nitrogen forms from controlled-release nitrogen fertilizers. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 28(17-18): 1663-1674. 1997.
 24. PAVAN, M. A.; DIAS, J. C.; SIQUEIRA, R.; ANDROCIOI, A.; COLOZZI, A.; LIBRIO, E. High coffee population density to improve fertility of an Oxisol. *Pesquisa Agropecuaria Brasileira* 34 (3): 459-465. 1999.
 25. PRADO B.; DUWING, C.; ESCUDEY, M.; ESTEVES, M. Nitrate sorption in a Mexican allophanic Andisol using intact and packed column. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 37(15-16): 2911-2925. 2006.
 26. ROJAS B., M.; NÚÑEZ Z., R.; ROJAS C., H. Pérdida de potasio por efecto de la fertilización nitrogenada. *Boletín Promecafé* No. 109 (oct.-dic. 2006); p. 11.
 27. SADEGHIAN K., S. Efecto de la fertilización con nitrógeno, fósforo, potasio y magnesio sobre las propiedades químicas de los suelos cultivados en café. *Cenicafé* 54(3): 242-257. 2003.

28. ----- Fertilización de café con nitrógeno y potasio en la etapa de crecimiento productivo en los distintos suelos de la zona cafetera. *In: Centro Nacional de Investigaciones de Café*. Chinchiná, Colombia. Informe anual de actividades de la Disciplina Suelos (Oct2004-Sep2005), Chinchiná, Cenicafé, 39 p. 2005.
- 29.----- Actualización y tendencia en la fertilización de café. *In: ACTUALIZACIÓN en fertilización de cultivos y uso de fertilizantes*. Bogotá, Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo, 2008. p. 41-57.
30. SADEGHIAN K., S.; GARCÍA L., J.C.; MONTOYA R., E.C. Respuesta del cafeto a la fertilización con N, P, K y Mg en dos fincas del departamento del Quindío. *Cenicafé* 57(1):58-69. 2006.
31. SANGOI, L.; ERNANI, P.R.; LECH, V.A.; RAMPAZZO, C. Nitrogen leaching as affected by urea application method and oat residue management in soils with contrasting textures. *Ciência Rural* 33(1): 65–70. 2003.
32. STEVENSON, F.J.; COLE, M.A. Cycles of soil: Carbon, nitrogen, phosphorus, sulfur, micronutrients. 2 ed. New York, John Wiley, 1999. 427 p.
33. STUMPE, J.M.; VLEK, P.L.G. Acidification induced by different nitrogen sources in columns of selected tropical soils. *Soil Science Society of America Journal* 55(1): 145-151. 1991.
34. TRIVELIN, P.C.O.; VICTORIA, R.L.; RODRIGUEZ, S.C.S. Aproveitamento por soqueira de cana de açúcar de final de safra do nitrogênio da aquamônia ¹⁵N e uréia ¹⁵N aplicado ao solo em complemento à vinhaça. *Pesquisa Agropecuária Brasileira* 30: 1375-1385. 1995.
35. VISCONTI, E.; CRIOLLO, B. Lixiviado de nitrógeno en suelos de textura contrastante empleando diferentes fertilizantes nitrogenados. *Suelos Ecuatoriales* 36: 10 p. 2006.
36. WHITE, R.E. Principles and practice of soil science: The soil as a natural resource. 4 ed. Victoria (Australia), Blackwell Publishing, 2006. 363 p.
37. VLEK, P.L.; CRASWELL, E.T. Ammonia volatilization from flooded soils. *Fertilizer Research* 2: 227-245. 1981.
38. ZAPATA, H.R. Química de la acidez del suelo. Cali, Ed. Cargraphics, 2004. 208 p.
39. ZHOU, Y. B.; XI, J. G.; CHEN, Z. J.; LI, S. X. Leaching and transformation of nitrogen fertilizers in soil after application of N with irrigation: A soil column method. *Pedosphere* 16(2): 245-252-2006.

