

Efecto de abonos de liberación lenta en la lixiviación de nitratos y nutrición nitrogenada en estevia

Effect of slow-release fertilizers on nitrate leaching and nitrogen nutrition in stevia

MARTHA CONSTANZA DAZA^{1, 2}

JEFFERSON DÍAZ¹

ESTEBAN AGUIRRE¹

NORBERTO URRUTIA¹

Lisímetros de drenaje para la evaluación de lixiviación de nitratos en estevia.

Foto: E. Aguirre



RESUMEN

La fertilización nitrogenada debe considerar las visiones agronómica y ambiental como el rendimiento del cultivo y menor contaminación para contribuir a la sostenibilidad de los sistemas agrícolas; los abonos de liberación lenta (ALL) integran estas dos visiones. El objetivo del estudio fue evaluar la aplicación de ALL en la lixiviación de nitratos y en características agronómicas de *Stevia rebaudiana* Bertoni. Se realizó un experimento completamente al azar con tres repeticiones haciendo uso de lisímetros de drenaje, evaluando dos abonos de síntesis química: nitrato de calcio y sulfato de amonio en tres dosis (100, 150 y 200 kg ha⁻¹ de N), tres ALL: urea con inhibidores de la enzima ureasa en tres dosis (100, 150 y 200 kg ha⁻¹ de N) y dos abonos orgánicos (lombricompost y gallinaza) en tres dosis (200, 250 y 300 kg ha⁻¹ de N). Se evaluó el nitrógeno (N) foliar, el N lixiviado y N total del suelo a los 45 y 90 días después del trasplante. También se evaluaron altura de planta, diámetro de tallo, masa seca y rendimiento, determinando índices de eficiencia del N, en donde los abonos orgánicos obtuvieron las mayores concentraciones de N foliar y el menor volumen de N lixiviado; no se encontraron diferencias significativas en las características agronómicas de las plantas y se presentaron eficiencias en el uso de N por debajo del 50%, donde los abonos de síntesis química fueron más eficientes (40%) al suministrar el N a las plantas de forma oportuna.

Palabras clave adicionales: eficiencia, urea de liberación lenta, lombricompost, gallinaza.

¹ Escuela de Ingeniería de Recursos Naturales y del Ambiente (Eidenar), Grupo de Investigación REGAR, Universidad del Valle, Cali (Colombia).

² Autor para correspondencia: martha.daza@correounivalle.edu.co

ABSTRACT

Nitrogen fertilization must consider agronomic and environmental visions, such as yield and low contamination, in order to contribute to the sustainability of agricultural production systems; slow-release fertilizers (SRF) integrate both visions. The aim of this study was to evaluate the application of SRF for nitrate leaching and the agronomic characteristics of stevia (*Stevia rebaudiana* Bertoni). An experiment with a completely randomized design was conducted with three replications, using drainage lysimeters, wherein two chemical synthesis fertilizers were evaluated: calcium nitrate and ammonium sulfate in three doses (100, 150 and 200 kg ha⁻¹ N) and three slow-release fertilizers: urea with urease enzyme inhibitors in three doses (100, 150 and 200 kg ha⁻¹ N) and two organic fertilizers (vermicompost and chicken manure) in three doses (200, 250 and 300 kg ha⁻¹ N). Foliar N, N leaching and soil N were evaluated at 45 and 90 days after transplantation. The height, stem diameter, dry mass and yield of the plants were also assessed and the N use efficiency ratios were determined. Significant differences were found in the foliar N and N leaching, where the organic fertilizers obtained the highest concentrations of foliar N and the lowest volume of leached N; No significant differences were found in the agronomic characteristics and N use efficiencies below 50% were seen, where the chemically synthesized fertilizers were more efficient (40%) and provided N to the plants in a more timely manner.

Additional key words: efficiency, slow-release urea, vermicompost, chicken manure.

Fecha de recepción: 11-03-20154

Aprobado para publicación: 28-05-2015

INTRODUCCIÓN

Las pérdidas de nitrógeno por lixiviación son inevitables a pesar de la implementación de las mejores prácticas agrícolas como el manejo del recurso hídrico y la adecuada fertilización nitrogenada (Jamali *et al.*, 2015). La lixiviación de N proveniente de la agricultura está directamente relacionada con el manejo del riego, la fertilización nitrogenada, las características del suelo, el uso del suelo y las condiciones climáticas (Arauzo y Valladolid, 2013). Cuando se aplican dosis de fertilizantes nitrogenados entre 25-50% por encima de la óptima para un determinado cultivo, la lixiviación se aumenta de forma exponencial en 5-7 kg hm⁻² de NO₃ (Delin y Stenberg, 2014). Las pérdidas de nitratos varían de acuerdo con las fases fenológicas de las plantas, siendo mayor en las etapas de germinación, crecimiento y desarrollo, disminuyendo en la etapa de cosecha; igualmente es independiente de la fuente de fertilizante (orgánico o inorgánico) (Reyes *et al.*, 2012).

Una de las estrategias que pueden contribuir a aumentar la eficiencia de la fertilización nitrogenada y reducir la lixiviación de nitratos es el uso de abonos de liberación lenta (ALL) ya sean inorgánicos u orgánicos. Dichos abonos tienen ventajas sobre los fertilizantes convencionales tales como el suministro lento y gradual de N, permitiendo mayor aprovechamiento por la planta (Rao *et al.*, 2007), disminución de la lixiviación (Xie *et al.*, 2011), reducción del efecto salino (Filippini *et al.*, 1991), reducción de la dosis (Hadas *et al.*, 2004), aumento de la eficiencia de la fertilización (González *et al.*, 2007), mayor acumulación de N en los tejidos vegetales (Barrios *et al.*, 2012), y en el caso de los orgánicos se ha reportado mayor retención de humedad (Xie *et al.*, 2011), aumento del contenido de N orgánico en el suelo, aumento en su mineralización (Cristobal-Acevedo *et al.*, 2011) e incremento de la actividad microbiana (Li *et al.*, 2008).

Como desventajas se tienen, en el caso de los inorgánicos su alto precio (Filippini *et al.*, 1991) aunque a largo plazo puede reducir los costos de producción al aumentar la eficiencia (Xie *et al.*, 2011); en el caso de los orgánicos las principales desventajas son su alta variabilidad en las tasas de mineralización del N (entre 10 y 30%) así como en solubilidad del N disponible (Flórez *et al.*, 2007), dificultando la determinación de la dosis adecuada, lo que conlleva a que aplicaciones periódicas de abonos orgánicos a largo plazo en altas dosis puedan eliminar la dependencia de fertilizantes inorgánicos pero igualmente se puede aumentar el riesgo de lixiviación de nitratos (Hadas *et al.*, 2004; Li *et al.*, 2008). Existen varios estudios relacionados con el uso de ALL y sus beneficios como menor efecto salino y menores pérdidas de N por lixiviación en hortalizas (Filippini *et al.*, 1991), mayor altura de planta y concentración de N foliar en gladiolo (González *et al.*, 2007), aumento de la fertilidad del suelo y el rendimiento de maíz (Quintanilla *et al.*, 2013), aumento de la mineralización del N en avena (Flórez *et al.*, 2007), aumento de la materia orgánica del suelo y de la disponibilidad de N y fósforo (P) en trigo (Hadas *et al.*, 2004) y reducción en la lixiviación de nitratos en pastos (Moreno *et al.*, 2007). Sin embargo, son escasos los referentes a su uso en fertilización de plantas aromáticas y medicinales, y más aún si se consideran las pérdidas por lixiviación de nitratos.

El propósito del trabajo fue estudiar la aplicación de ALL de nitrógeno (inorgánicos y orgánicos) en la lixiviación de nitratos y en algunas características agronómicas de plantas de estevia (*Stevia rebaudiana* Bertoni) con el fin de contribuir a la integración de las visiones agronómica y ambiental en el manejo del N en la agricultura.

MATERIALES Y MÉTODOS

El experimento se realizó en el invernadero del Laboratorio de Aguas y Suelos Agrícolas (LASA) de la Universidad del Valle, ubicado en el muni-

cipio de Santiago de Cali, Valle Del Cauca, a una altura de 979 msnm; en latitud 3°22'22,29" N y longitud 76°31'49,22" W. Los valores de temperatura y precipitación promedio anual son de 25°C y 909 mm respectivamente.

El diseño experimental fue completamente al azar estableciendo 14 tratamientos con tres repeticiones para un total de 42 unidades experimentales. Cada unidad consistió de un lisímetro de drenaje con suelo previamente tamizado en un tamiz de 2 mm y colocando en él, una plántula de estevia. Los lisímetros fueron ubicados a distancias de 0,30 m entre ellos. Los tratamientos fueron: testigo (T), nitrato de calcio (NC), urea de liberación lenta (U) y sulfato de amonio (SA) en dosis de 100, 150 y 200 kg ha⁻¹ de N (U100, U150, U200, SA100, SA150 y SA200, respectivamente), lombricompost (L) y gallinaza (G) en dosis de 200, 250 y 300 kg ha⁻¹ de N (L200, L250, L300, G200, G250 y G300, respectivamente). Las dosis utilizadas fueron escogidas con base a los requerimientos de plantas de estevia mencionadas por Casaccia y Álvarez (2006).

Los lisímetros consistieron en recipientes plásticos de 0,25 m de altura por 0,30 m de diámetro, recubiertos con malla y grava donde se dispuso el suelo. El recipiente se perforó en la parte inferior lateral y se instaló una manguera conectada a un segundo recipiente debidamente tapado, dentro del cual se ubicó un vaso graduado para la recolección del lixiviado. Se estableció una diferencia de altura entre el lisímetro y el recipiente recolector para favorecer el flujo. La recolección se realizó diariamente y la muestra fue guardada en condiciones refrigeradas hasta cuando se contó con suficiente cantidad de lixiviado para ser analizado.

El suelo utilizado provino del municipio de Villa Rica (Cauca), donde se cultiva estevia de forma comercial; dicho suelo presentó textura franco arcillosa con alta conductividad eléctrica, concentración de bases intercambiables y nitratos, y bajo contenido de amonio de acuerdo con lo reportado por Fernández *et al.* (2006) (tabla 1).

Tabla 1. Caracterización inicial del suelo utilizado en la experimentación.

Parámetro (unidades)	Valor	Parámetro (unidades)	Valor
Textura	FAR ¹	Fe (mg kg ⁻¹)	10,0
pH	7,9	Mn (mg kg ⁻¹)	77,0
CE (dS m ⁻¹)	3,9	Cu (mg kg ⁻¹)	7,2
CICE ² (cmol ⁽⁺⁾ kg ⁻¹)	29,7	Zn (mg kg ⁻¹)	38,0
CO (%)	3,5	B (mg kg ⁻¹)	2,8
K (mg kg ⁻¹)	438,0	P (mg kg ⁻¹)	4.217,0
Ca (mg kg ⁻¹)	3.006,0	S-SO ₄ (mg kg ⁻¹)	422,0
Mg (mg kg ⁻¹)	1.103,0	N-NH ₄ (mg kg ⁻¹)	13,0
Na (mg kg ⁻¹)	1.021,0	N-NO ₃ (mg kg ⁻¹)	177,0

¹ FAR: franco arcilloso; ²CICE: capacidad de intercambio catiónico efectiva.

El ALL usado fue Nitroextend+S el cual contiene 40% de nitrógeno estabilizado y 6% de azufre además de inhibidores de la enzima ureasa. Se aplicó el 50% de la dosis en el momento del trasplante distribuyéndolos homogéneamente en toda el área de la materia y el otro 50% restante a los 30 días después del trasplante (ddt) distribuyéndolos alrededor de la planta a 5 cm de profundidad; la aplicación de los abonos convencionales inorgánicos se realizó de igual manera. Los abonos orgánicos fueron caracterizados siguiendo la Norma Técnica Colombiana 5167 (Icontec, 2011), los cuales presentaron pH ligeramente alcalino, alta CIC y baja relación C/N (tabla 2) aplicados 8 d antes del trasplante.

Las láminas de riego fueron calculadas a partir de la evaporación potencial medida en tanque evaporímetro ubicado dentro del invernadero; el coeficiente del tanque fue de 0,75 (Allen *et al.*,

2006) y el coeficiente de cultivo promedio de 1,2 (Jurado y Torres, 2013). Se empleó un sistema de riego por goteo para el suministro diario de la lámina, el cual fue calibrado previamente.

Como variables de respuesta se midieron el porcentaje de nitrógeno foliar (NF), porcentaje de nitrógeno en el suelo (NTS) y concentración de nitratos en lixiviado (NL) utilizando el método de Kjeldahl (IGAC, 2006). NF y NL se determinaron a los 45 y a los 90 ddt, mientras que NTS solamente a los 90 ddt. A partir del volumen acumulado de lixiviados se determinó la cantidad de nitratos lixiviados a los 45 y 90 ddt así como la cantidad total de nitratos perdidos en el ciclo del cultivo.

Se midió además la altura de planta (desde la superficie del suelo hasta el ápice), diámetro de tallo (a 0,2 m de la superficie del suelo) y masa seca total (MS) (a los 90 d cuando empieza la primera cosecha), para lo cual se tuvo en cuenta las hojas, el tallo y las raíces; una vez recolectados fueron dispuestas en estufa a 55°C por 24 h para luego ser pesadas en balanza de precisión. También el rendimiento (t ha⁻¹) se determinó a partir del peso seco de las hojas de la planta. Se consideraron los indicadores “eficiencia aparente de recuperación de N” y “eficiencia interna de utilización” propuestos por Dobermann (2007).

La verificación de la distribución normal de los datos se hizo siguiendo la prueba de Shapiro Wilks y la homogeneidad de varianzas se determinó con la prueba de Levene. Se realizó análisis estadístico descriptivo, análisis de varianza y prueba de Tukey para determinar las diferencias

Tabla 2. Caracterización de los abonos orgánicos utilizados en la experimentación.

Abono orgánico	pH	CIC (cmol ⁽⁺⁾ kg ⁻¹)	CO (%)	NT (%)	C/N	K (%)	Ca (%)	Mg (%)
Lombricompost	7,3	24,6	13,0	1,0	13,0	1,0	3,8	1,1
Gallinaza	7,5	34,5	16,0	1,3	12,3	1,2	11,2	0,4

CIC: capacidad de intercambio catiónico; CO: carbono orgánico; NT: nitrógeno total.

significativas resultantes entre tratamientos. Para las variables NF a los 45 d, NL y MS se realizó la prueba no paramétrica de Kruskal Wallis y comparación de medias mediante la prueba de Dunnet. Los diferentes análisis estadísticos se realizaron bajo la plataforma del programa estadístico SPSS Statistics Versión 20.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Efecto de la aplicación de ALL en N foliar, N total del suelo y N lixiviado

Los valores de N foliar a los 45 ddt oscilaron en un rango de entre 0,05% y 1,97% con diferencias significativas entre tratamientos ($P \leq 0,05$) (tabla 3). El mayor porcentaje encontrado correspondió a SA200 sin diferencias significativas con los abonos orgánicos, U150 y U200. Tampoco se encontraron diferencias con NC pero sí fue significativamente diferente del testigo (T) y de U100. La aplicación de la lámina de agua en las etapas tempranas del cultivo fomentó la lixiviación del N limitando la absorción por las plantas, puesto que el Kc utilizado es un valor promedio para todas las etapas fenológicas (Reyes *et al.*, 2012). Es posible que el tiempo de aplicación y la dosis aplicada de la urea de liberación lenta hayan afectado la absorción de N por la planta al favorecer la inmovilización y reducir su disponibilidad. A mayor dosis de U aplicada se presentó mayor concentración de NF. A pesar de no encontrar diferencias significativas entre tratamientos, U200 superó en 29% el NF alcanzado por NC, pero estuvo 51% por debajo de SA200. En comparación con los abonos orgánicos, el lombricompost (L) alcanzó 20% más de NF que U200, mientras que la gallinaza (G) obtuvo valores similares a U200.

A los 90 ddt el contenido de NF fue similar para todos los tratamientos. Los porcentajes se hallaron entre 0,70% y 2,12%. De acuerdo con Osorio (2014) los contenidos de NF en general para las plantas están en el orden de 2% y 6%. Borda-Molina *et al.* (2011) han reportado contenidos

de NF para estevia entre 1,92% y 2,20%. Es de resaltar que los tratamientos T, U100, U200 y SA100, obtuvieron porcentajes por debajo de 1%, mostrando las plantas deficiencia del elemento que pudo incidir en la cosecha obtenida. Los abonos orgánicos obtuvieron valores de NF por encima de 1% pero estuvieron entre 30 y 45% por debajo de SA200. Similar a lo hallado por Das *et al.* (2008), la deficiencia en N se manifestó en amarillamiento foliar y repercutió en las características agronómicas como altura de planta, diámetro de tallo y porcentaje de masa seca

No se encontraron diferencias significativas en NTS. Los valores estuvieron entre 0,22% y 0,42%, considerados alto según evaluaciones realizadas por González *et al.* (2015). A pesar de esto, al contrastar con el NF a los 90 d, los tratamientos U presentaron los menores valores. Esto podría deberse a que el contenido de NTS esta principalmente en formas orgánicas que no permiten la rápida asimilación por parte de la planta. La velocidad de suministro del nutriente brindado por los tratamientos U no lograron abastecer a la planta, lo que sugiere que la aplicación de este tipo de fertilizante de liberación lenta debe hacerse con mayor tiempo de anterioridad a la siembra o trasplante para garantizar el suministro apropiado del N en el momento de mayor demanda por la planta. El valor alto de pH del suelo así como las altas temperaturas registradas en el periodo de la experimentación incurrieron en la actividad microbiana, limitando la solubilización de la urea y la descomposición de los abonos orgánicos, reduciendo la disponibilidad de N para la planta (Ramos y Zúñiga, 2008).

Las concentraciones de NL a los 45 ddt oscilaron entre 0,21 y 31,0 mg L⁻¹. Las mayores concentraciones de nitratos se presentaron en NC y SA, mostrando que estos fertilizantes suministran N rápidamente para las plantas pero son propensos a perderse por lixiviación. Por otra parte, se hallaron concentraciones menores en los abonos orgánicos, debido posiblemente, a que en su composición, la mayor parte del N presente es

Tabla 3. Efecto de la aplicación de abonos de liberación lenta en los porcentajes de nitrógeno foliar (NF), nitrógeno total en el suelo (NTS) y en la concentración de nitratos en lixiviados (NL) en estevia (*Stevia rebaudiana*).

Tratamiento	NF (%)		NTS suelo (%)	NL (mg L ⁻¹)	
	45 ddt	90 ddt	90 ddt	45 ddt	90 ddt
T	0,86 ± 0,14 ab	0,70 ± 0,42 a	0,29 ± 0,13 a	2,07 ± 2,07 cb	3,31 ± 3,00 abc
NC	0,68 ± 0,27 ab	1,35 ± 0,41 a	0,40 ± 0,05 a	25,83 ± 13,208 ab	11,57 ± 3,85 ab
U100	0,12 ± 0,00 b	0,85 ± 0,31 a	0,41 ± 0,06 a	3,10 ± 1,99 bc	3,51 ± 2,28 abc
U150	0,36 ± 0,25 ab	1,00 ± 0,26 a	0,22 ± 0,04 a	3,10 ± 3,10 bc	1,24 ± 0,62 abc
U200	0,96 ± 0,63 ab	0,85 ± 0,40 a	0,26 ± 0,08 a	3,72 ± 2,84 bc	1,03 ± 0,21 ab
SA100	1,42 ± 0,62 ab	0,75 ± 0,41 a	0,36 ± 0,08 a	7,65 ± 2,16 abc	1,86 ± 1,30 abc
SA150	0,45 ± 0,31 ab	1,67 ± 0,45 a	0,35 ± 0,09 a	4,96 ± 3,28 bc	0,41 ± 0,42 bc
SA200	1,97 ± 0,05 a	2,12 ± 0,83 a	0,28 ± 0,11 a	31,00 ± 7,88 a	12,4 ± 6,20 a
L200	1,03 ± 0,49 ab	1,30 ± 0,59 a	0,34 ± 0,12 a	3,31 ± 1,69 bc	0,83 ± 0,42 bc
L250	0,49 ± 0,43 ab	1,17 ± 0,25 a	0,41 ± 0,06 a	4,96 ± 2,51 bc	3,10 ± 0,95 abc
L300	1,20 ± 0,42 ab	1,16 ± 0,23 a	0,42 ± 0,35 a	2,89 ± 2,90 bc	0,62 ± 0,36 bc
G200	0,85 ± 0,50 ab	1,23 ± 0,59 a	0,29 ± 0,11 a	8,06 ± 2,70 abc	1,45 ± 0,55 abc
G250	0,91 ± 0,06 ab	1,48 ± 0,76 a	0,39 ± 0,12 a	0,21 ± 0,21 c	0,21 ± 0,21 c
G300	0,73 ± 0,34 ab	1,23 ± 0,53 a	0,36 ± 0,07 a	2,07 ± 1,49 bc	0,62 ± 0,36 bc

Valores promedio ± error estándar calculado como S/\sqrt{n} ; ddt: días después del trasplante; T: testigo; NC: nitrato de calcio; U: urea de liberación lenta; SA: sulfato de amonio; L: lombricompost; G: gallinaza. Los números de los tratamientos indican las dosis empleadas en kg ha^{-1} de N. Promedios con letras distintas indican diferencia significativa según la prueba de Tukey ($P \leq 0,05$) para las variables NF 90 dds y NTS y la prueba de Dunnett para las variables NF a los 45 dds y NL.

orgánico, por lo cual es necesaria la realización del proceso biológico de la mineralización para llegar a formas químicas inorgánicas asimilables por la planta. Es importante resaltar que a pesar de utilizar un Kc promedio aproximado y usar ALL orgánicos e inorgánicos se presentó lixiviación de nitratos para todos los tratamientos. La aparición de flujos preferentes en la matriz del suelo, dado su alto contenido de arcillas, hace que el agua aplicada de riego no se distribuya uniformemente y que se presente lixiviación. Estos flujos preferenciales también son comunes encontrarlos en suelos sin disturbar debido a la presencia de grietas ocasionados por arcillas expansivas comunes en los suelos del valle del río Cauca como lo han reportado Peñarete *et al.* (2013). Sin embargo, la utilización de U, L y G lograron disminuir la concentración de NL en 88%, 84% y 74% respectivamente en comparación con SA200. Similares resultados fueron reportados por Alfaro *et al.* (2006), quienes valoraron la lixiviación de nitratos al aplicar 150

kg hm^{-2} de N por medio de abonos orgánicos e inorgánicos y encontraron que la concentración de nitratos en los lixiviados fue 50% más alta en los tratamientos con abonos inorgánicos que con los orgánicos.

A los 90 d las concentraciones de NL disminuyeron para todos los tratamientos. Los tratamientos SA200 y NC obtuvieron significativamente la mayor concentración de NL en comparación con los demás ($P = 0,001$). A pesar de que las concentraciones halladas en todos los tratamientos no superaron la máxima concentración recomendada por la OMS para el agua de consumo de 50 mg L^{-1} de nitratos (Arauzo y Valladolid, 2013), la presencia de N en los lixiviados implican bajas eficiencias en la fertilización nitrogenada y aumento en los costos de producción, puesto que este N no es aprovechado por las plantas, y por tanto, se requerirán mayores dosis de fertilizante para la obtención de altos rendimientos.

Con excepción de SA200 y G200, la mayor pérdida de nitratos se presentó a los 45 ddt (figura 1). Los tratamientos NC y SA mostraron la mayor pérdida de nitratos debido a la rápida solubilidad del fertilizante en comparación con los demás. La mayor dosis del SA tuvo la mayor lixiviación de nitratos. La pérdida de nitratos de los tratamientos U estuvieron por debajo del 50% perdido por los fertilizantes convencionales; con excepción del tratamiento G250, todos los tratamientos estuvieron por encima del testigo.

El tratamiento SA200 produjo la mayor pérdida neta de nitratos durante el periodo de evaluación del cultivo de estevia (trasplante hasta inicio de cosecha) (figura 2), la cual estuvo 40% por encima de NC y en promedio 80% más que U. Los abonos orgánicos con excepción de G200 mostraron menor pérdida total de nitratos similar a T, que estuvieron por debajo de 2 mg. El proceso de mineralización de los abonos orgánicos hace que se limite la disponibilidad de

N inorgánico y sea fuente de N en el tiempo (González y Pomares, 2008).

Efecto de la aplicación de ALL en características agronómicas de estevia

La altura de las plantas presentaron un rango entre 30,0 y 38,7 cm sin diferencias significativas entre ellas ($P>0,05$) (tabla 4). La mayor altura encontrada correspondió al NC mientras que la menor fue para U100. Los valores encontrados para los tratamientos U fueron similares a los obtenidos con los tratamientos SA. Las alturas de plantas de NC estuvieron entre 5,4 y 8,7 cm por encima de U, lo que les permitió ser mejores competidoras por luz, puesto que las distancias de ubicación de los lisímetros fue insuficiente y se presentó traslape de follaje entre plantas. Igualmente los abonos orgánicos y T obtuvieron mayores alturas que las plantas fertilizadas con U, cuyos valores estuvieron entre 2,0 y 7,7 cm por debajo, lo cual está relacionado con los resultados encontrados de NTS.

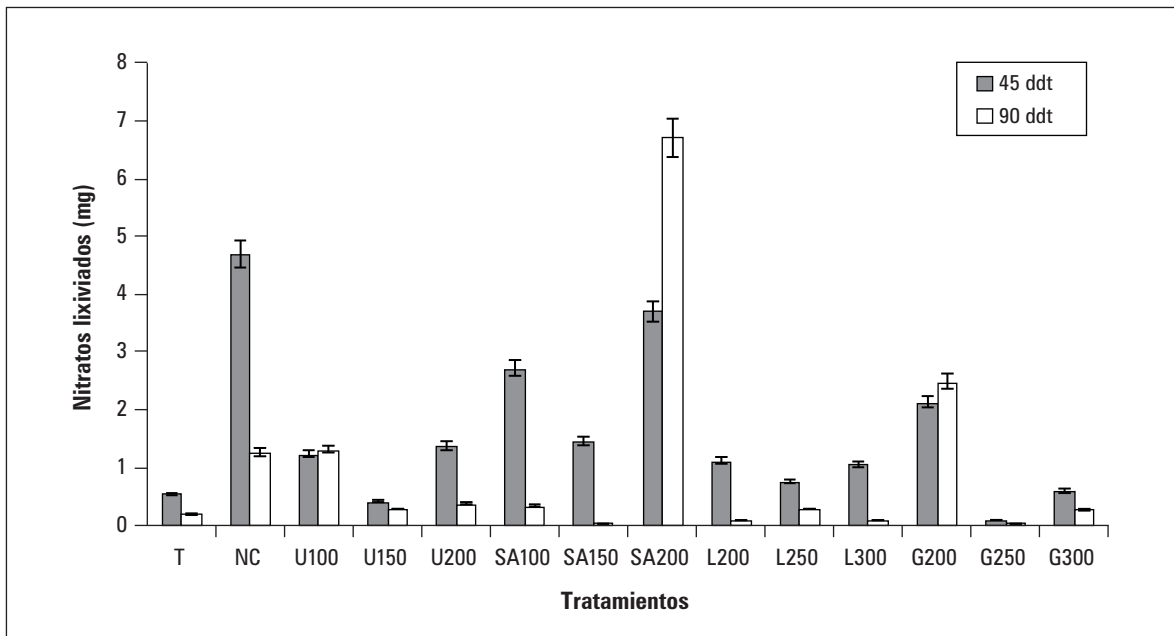


Figura 1. Efecto de los fertilizantes de liberación lenta en la cantidad de nitratos lixiviados a los 45 y 90 días después del trasplante (ddt) en un cultivo de estevia (*Stevia rebaudiana*). T: testigo; NC: nitrato de calcio; U: urea de liberación lenta; SA: sulfato de amonio; L: lombricompost; G: gallinaza. Los números de los tratamientos indican las dosis empleadas en kg ha⁻¹ de N. Las barras de error demuestran el error típico.

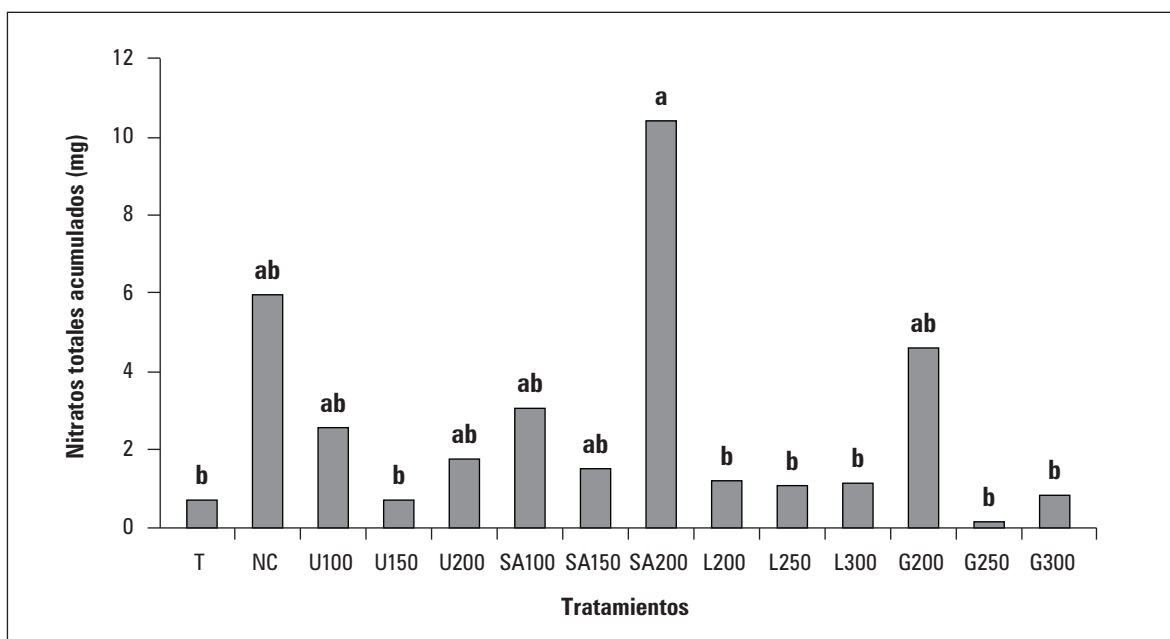


Figura 2. Efecto de los fertilizantes de liberación lenta en la cantidad total de nitratos lixiviados en un cultivo de estevia (*Stevia rebaudiana*). T: testigo; NC: nitrato de calcio; U: urea de liberación lenta; SA: sulfato de amonio; L: lombricompost; G: gallinaza. Los números de los tratamientos indican las dosis empleadas en kg ha^{-1} de N. Promedios con letras distintas indican diferencia significativa según la prueba de Tukey ($P \leq 0,05$).

Los diámetros de tallo presentaron un rango entre 3,8 y 4,6 mm sin diferencias significativas entre tratamientos (tabla 4). La aplicación de la lámina de agua con el coeficiente promedio hallado por Jurado y Torres (2013) posiblemente estuvo por debajo del óptimo y no permitió calcular la lámina apropiada de agua puesto que las plantas en días de altas temperaturas alcanzaron a presentar estrés hídrico. A partir de estos resultados, probablemente en la época de mayor producción y desarrollo, el Kc debe ser mayor. No se presentaron diferencias entre dosis de U ni de estas con NC y L. Los tratamientos con gallinaza obtuvieron diámetros mayores que los obtenidos por U y NC. Los mayores valores de altura de planta y diámetro de tallo de los abonos orgánicos pueden estar relacionados con el mejoramiento de las propiedades físicas del suelo.

La masa seca estuvo en un rango de 10,8 y 24,7 g/planta sin diferencias significativas entre tratamientos. Pese a que no se encontraron di-

ferencias significativas, las masas secas de los tratamientos con U resultaron más bajas que las halladas con NC, SA y los abonos orgánicos parecidas a las obtenidas en T, lo cual indica que la época de aplicación del fertilizante de liberación lenta no fue suficiente para que se disolviera el N y fuera disponible de forma oportuna para la planta y que características del suelo como el pH alto tuvieron incidencia en la volatilización de este tipo de fertilizante y limitara el suministro del nutriente a la planta. Los rendimientos en producción de hoja seca tampoco presentaron diferencias significativas entre tratamientos. Los valores encontrados oscilaron entre 3,5 y 7,7 t ha^{-1} similares a los reportados por Yang *et al.* (2013) quienes evaluaron la producción de masa seca aplicando diferentes planes de fertilización alcanzando rendimientos máximos de 4,5 t ha^{-1} . Los abonos orgánicos fueron los tratamientos con los rendimientos más altos por encima de NC y SA, donde se destaca el alcanzado por G300.

Tabla 4. Efecto de abonos de liberación lenta en características agronómicas de plantas de estevia (*Stevia rebaudiana*).

Tratamiento	Altura de planta (cm)	Diámetro de tallo (mm)	Masa seca (g/planta)	Rendimiento (t ha ⁻¹)
T	36,3 ± 0,34	4,2 ± 0,09	14,7 ± 1,10	4,6 ± 0,16
NC	38,7 ± 1,86	3,8 ± 0,07	18,9 ± 2,38	5,9 ± 1,01
U100	30,0 ± 0,58	3,9 ± 0,31	11,1 ± 0,46	3,7 ± 0,07
U150	33,3 ± 2,91	3,9 ± 0,07	17,0 ± 1,98	5,2 ± 0,60
U200	33,0 ± 3,06	3,9 ± 0,27	10,8 ± 2,10	3,5 ± 1,03
SA100	34,7 ± 1,46	4,6 ± 0,23	17,5 ± 2,27	5,2 ± 0,37
SA150	32,3 ± 1,20	3,9 ± 0,15	15,2 ± 3,44	4,8 ± 1,15
SA200	32,7 ± 2,75	4,2 ± 0,29	16,7 ± 4,41	4,8 ± 1,14
L200	37,7 ± 2,03	3,8 ± 0,38	20,5 ± 2,31	6,9 ± 0,82
L250	35,3 ± 2,33	3,8 ± 0,17	18,4 ± 1,40	6,4 ± 0,40
L300	37,3 ± 1,46	4,1 ± 0,07	13,7 ± 1,14	4,8 ± 0,84
G200	34,7 ± 3,18	4,3 ± 0,07	13,6 ± 0,94	4,7 ± 0,45
G250	30,3 ± 1,67	4,3 ± 0,15	12,0 ± 1,22	3,9 ± 0,75
G300	37,3 ± 2,19	4,0 ± 0,27	24,7 ± 1,79	7,7 ± 0,62

Valores promedio ± error estándar calculado como S/\sqrt{n} ; ddt: días después del trasplante; T: testigo; NC: nitrato de calcio; U: urea de liberación lenta; SA: sulfato de amonio; L: lombricompost; G: gallinaza. Los números de los tratamientos indican las dosis empleadas en kg ha⁻¹ de N. Promedios con letras distintas indican diferencia significativa según la prueba de Tukey ($P \leq 0,05$) para las variables NF 90 dds y NTS y la prueba de Dunnet para las variables NF a los 45 dds y NL.

Eficiencia de uso de fertilizante nitrogenado

La eficiencia aparente de recuperación de N estuvo por debajo del 50% para todos los tratamientos siendo acorde por lo reportado por Hirel *et al.* (2011) (figura 3). El tratamiento NC obtuvo la mayor eficiencia, 30% más que SA y 40% más que los ALL. Los tratamientos con SA presentaron baja eficiencia a pesar de que obtuvieron los más altos contenidos de NF. Es posible que estos fertilizantes en el proceso de mineralización hayan presentado pérdidas por volatilización al igual que U debido, posiblemente a las condiciones alcalinas del suelo. Los abonos orgánicos obtuvieron bajas eficiencias; aunque fueron los tratamientos que menos NL presentaron, obtuvieron concentraciones de NF baja lo que puede deberse a bajas tasas de mineralización y, por tanto, la baja disponibilidad de N inorgánico en el momento de la medición. Lo anterior indica que las mediciones de eficiencia de ALL debe contemplar el efecto residual, puesto que es probable

que en la siguiente cosecha su eficiencia aumente al ser reservorios del nutriente en el suelo.

Los valores de eficiencia interna de utilización estuvieron por debajo de 50 kg kg⁻¹ (figura 4), no alcanzando el rango óptimo reportado por Dobermann (2007) entre 55 y 65 kg kg⁻¹ que son los valores encontrados en cultivos con nutrición balanceada a niveles altos de rendimiento. Estos resultados correlacionan con la baja eficiencia aparente de recuperación y con los resultados encontrados en las características agronómicas de las plantas (altura de planta, diámetro de tallo, masa seca y rendimiento).

CONCLUSIONES

A pesar de que no se encontraron diferencias significativas en las variables agronómicas de las plantas (altura de planta, diámetro de tallo, masa seca y rendimiento), sí se encontraron di-

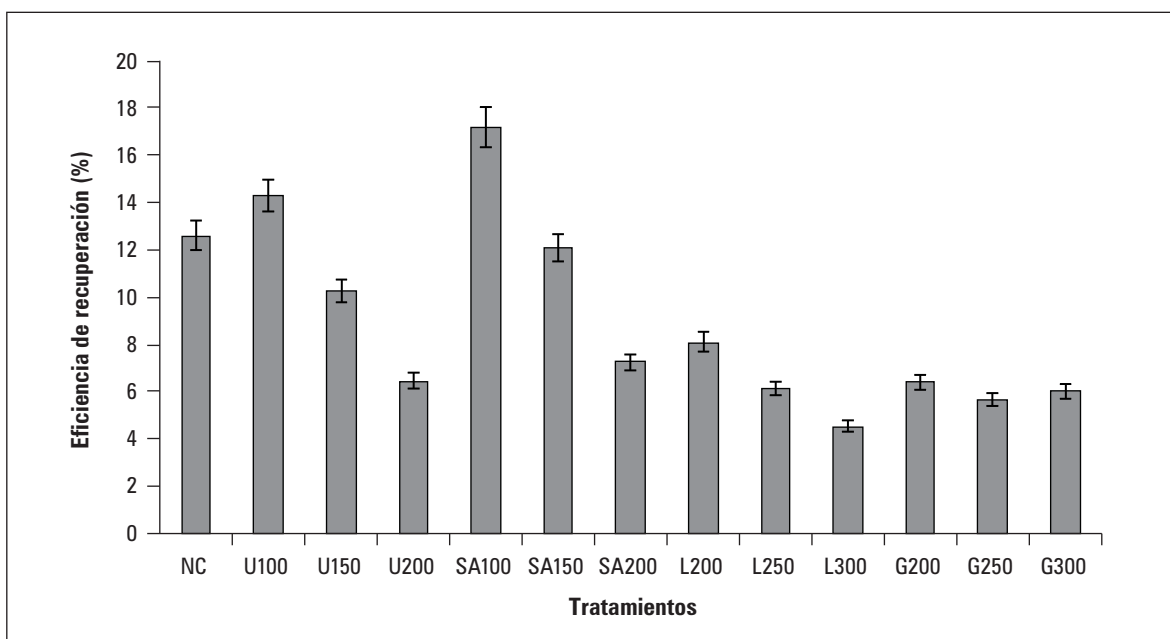


Figura 3. Eficiencia aparente de recuperación de N de abonos de liberación lenta en estevia (*Stevia rebaudiana*). NC: nitrato de calcio; U: urea de liberación lenta; SA: sulfato de amonio; L: lombricompost; G: gallinaza. Los números de los tratamientos indican las dosis empleadas en kg ha⁻¹ de N. Las barras de error demuestran el error típico.

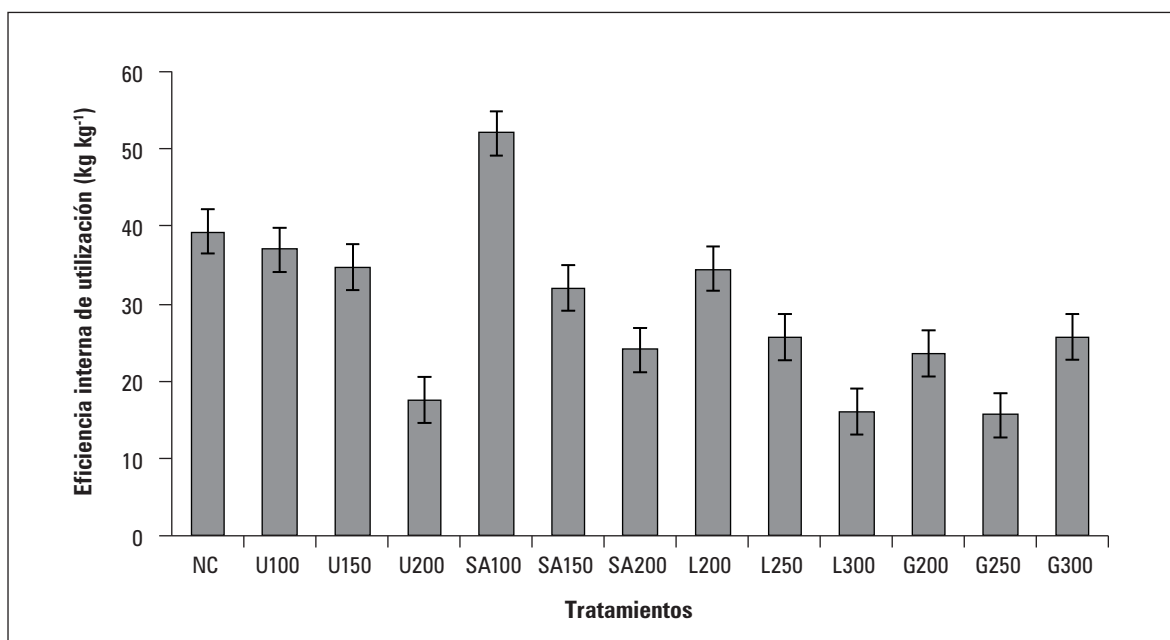
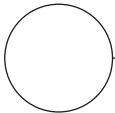


Figura 4. Eficiencia interna de utilización de N de abonos de liberación lenta en estevia (*Stevia rebaudiana*). NC: nitrato de calcio; U: urea de liberación lenta; SA: sulfato de amonio; L: lombricompost; G: gallinaza. Los números de los tratamientos indican las dosis empleadas en kg ha⁻¹ de N. Las barras de error demuestran el error típico.

ferencias en la concentración y cantidad de nitratos lixiviados cuando se usaron ALL. Todos los fertilizantes utilizados en la presente investigación presentaron bajas eficiencias de uso del nitrógeno. Los fertilizantes de síntesis química presentaron mayores pérdidas por lixiviación, mientras que los de liberación lenta dejaron bajo N disponible para la planta, por procesos lentos de solubilización y mineralización, lo que repercutió en el desarrollo de las plantas de estevia.

La adición de fertilizantes que promuevan el desarrollo vegetal y genere altas cargas de contami-

nantes, resulta peligrosa por su afectación al aire y el agua. De igual forma, es importante la prevención de la contaminación por nitratos hacia otros sistemas pero no en detrimento de los rendimientos de los cultivos y la economía del agricultor. Esto parece indicar que la fertilización nitrogenada es una de las actividades agrícolas que necesitan de visión integral para contribuir a la sostenibilidad de los sistemas productivos agrícolas. Esta visión debe contemplar no solo la fertilización para obtener altos rendimientos de los cultivos, sino también debe considerar el menor impacto en el agua y el aire.



REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alfaro, M., F. Salazar, E. Endress, J.C. Dumont y A. Valdebenito. 2006. Nitrogen leaching losses on a volcanic ash soil as affected by the source of fertilizer. *J. Soil Sci. Plant Nutr.* 6(2), 54-63. Doi: 10.4067/S0718-27912006000200005
- Allen, R., L.D. Pereira, Raes y M. Smith. 2006. Evapotranspiración del cultivo. Guía para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. Organización de las Naciones Unidas para la agricultura y la alimentación FAO. Estudio Riego y Drenaje No. 56. Roma.
- Arauzo, M. y M. Valladolid. 2013. Drainage and N-leaching in alluvial soils under agricultural land uses: implications for the implementation of the UE Nitrates Directives. *Agr. Ecosyst. Environ.* 179, 94-107.
- Ballester-Olmos, J.F. 1995. Abonos nitrogenados de liberación lenta. Instituto Valenciano de Investigaciones Agrarias, Valencia, España.
- Barrios, M., J. García y G. Basso. 2012. Efecto de la fertilización nitrogenada sobre el contenido de nitrato y amonio en el suelo y en la planta de maíz. *Bioagro* 24(3), 213-220.
- Borda-Molina, D., J. Pardo, M. Martínez y J. Montaña. 2009. Producción de un biofertilizante a partir de un aislamiento de *Azotobacter nigricans* obtenido en un cultivo de *Stevia rebaudiana*. *Bert. Universitas Scientiarum* 14(1), 71-78.
- Casaccia, J. y E. Álvarez. 2006. Recomendaciones técnicas para una producción sustentable del ka'a He'e (*Stevia rebaudiana* Bertoni) en el Paraguay. Ministerio de Agricultura y Ganadería. Subsecretaría de Estado de Agricultura. Manual técnico N° 8. En: www.mag.gov.py/KAA%20HEE.pdf; consulta: junio de 2013.
- Cristobal-Acevedo, D., M.V. Álvarez, E. Hernández y R. Améndola. 2011. Concentración de N en suelo por efecto de manejo orgánico y convencional. *Terra Latinoamericana* 29(3), 325-332.
- Das K., R. Dang y T. Shivananda. 2008. Influence of bio-fertilizers on the availability of nutrients (N, P & K) in soil, in relation to growth and yield of *Stevia rebaudiana* grown in South India. *Int. J. Appl. Res. Nat. Produc.* 1(1), 20-24.
- Delin, S. y M. Stenberg. 2014. Effect of nitrogen fertilization on nitrate leaching in relation to grain yield response on loamy sand in Sweden. *Eur. J. Agron.* 52, 291-296. Doi: 10.1016/j.eja.2013.08.007
- Dobermann, A. 2007. Nutrient use efficiency-measurement and management. pp. 1-28. Proc. International Fertilizer Industry Association (IFA) Workshop on Fertilizer Best Management Practices. Bruselas.
- Fernández, L.C., N.G., Rojas, T.G. Roldán, M.E. Ramírez, H.G. Zegarra, R. Uribe, R.J. Reyes, D. Flórez, y J.M. Arce. 2006. Manual de técnicas de análisis de suelos aplicadas a la remediación de sitios contami-

- nados. Instituto Mexicano del Petróleo, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Instituto Nacional de Ecología. México.
- Filippini, M.F., J.C. Gaviola y M.A. Jauregui, 1991. Comportamiento de un fertilizante nitrogenado de liberación lenta. *Ciencia del Suelo* 9(1-2), 53-60.
- Flórez, J.P., B. Corral y G. Sapien. 2007. Mineralización de nitrógeno de biosólidos estabilizados con cal en suelos agrícolas. *Terra Latinoamericana* 25(4), 409-417.
- González, V., M. Leal, J. Lillo, I. De Bustamante y P. Palacios. 2015. Guía de caracterización edáfica para actividades de regeneración de aguas residuales en usos ambientales. Red Consolider Tragua. Gobierno de España. En: http://www.consolider-tragua.com/documentos/guia_caracterizacion_edafica.pdf; consulta: febrero de 2015.
- González, M., M. Hernández, D. Dupeyron, J. Rieumont, C. Rodríguez, E. Cuesta y C. Sardiña. 2007. Síntesis y comportamiento de un material polimérico aplicado como recubrimiento en un fertilizante de liberación controlada. *Rev. Iberoam. Polím.* 8(4), 275-286.
- Gonzalvez, V. y F. Pomares, 2008. La fertilización y el balance de nutrientes en sistemas agroecológicos. Sociedad Española de Agricultura Ecológica, Madrid.
- Hadas, A., M. Agassi, H. Zhevelev, L. Kautsky, G.J. Levy, E. Fizik y M. Gotesman. 2004. Mulching with composted municipal solid wastes in the Central Negev Israel. II Effect on available nitrogen and phosphorus and on organic matter in soil. *Soil Till. Res.* 78, 115-128. Doi: 10.1016/j.still.2004.02.020
- Hirel, B., T. Tétu, P. Lea y F. Dubois. 2011. Improving nitrogen use efficiency in crops for sustainable agriculture. *Sustainability* 3, 1452-1485. Doi: 10.3390/su3091452
- Iontec. 2011. NTC Norma Técnica Colombiana 5167. Productos para la industria agrícola. Productos orgánicos usados como abonos o fertilizantes y enmiendas o acondicionadores de suelo. 2011. Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación, Bogotá.
- IGAC. 2006. Métodos analíticos del laboratorio de suelos. 6^{ta} ed. Instituto Geográfico Agustín Codazzi, Bogotá.
- Jamali, H., W. Quayle y J. Baldock. 2015. Reducing nitrous oxide emissions and nitrogen leaching losses from irrigated arable cropping in Australia through optimized irrigation scheduling. *Agr. Forest Meteorol.* 208, 32-39. Doi: 10.1016/j.agrformet.2015.04.010
- Jurado, A. y V. Torres. 2013. Estimación del coeficiente multiplicador de la evapotranspiración para un cultivo de estevia (*Stevia rebaudiana* Bertoni). Trabajo de grado. Facultad de Ingeniería, Universidad del Valle, Cali, Colombia.
- Li, J., B. Zhao, X. Li, R. Jiang y H.B. So. 2008. Effects of long-term combined application of organic and mineral fertilizers on microbial biomass, soil enzyme activities and soil fertility. *Agr. Sci. China* 7(3), 336-343. Doi: 10.1016/S1671-2927(08)60074-7
- Moreno, G., M.L. López, F. Oliveira y M. Cunha. 2007. Eficacia de los sistemas agroforestales en el control de la lixiviación de nitrato. *Sociedad Española de Ciencias Forestales* 22, 113-118.
- Osorio, N.W. 2014. Manejo de nutrientes en suelos del trópico. 2^{da} ed. Vieco L. S.A.S., Medellín, Colombia.
- Peñarete, W., J. Silva, N. Urrutia, M. Daza y P. Torres. 2013. Efecto de aplicación de biosólidos sobre las propiedades físicas de un suelo cultivado con caña de azúcar. *Acta Agron.* 62(3), 251-260.
- Quintanilla, F.N., C.C. Yanes y C.B. Monge. 2013. Incidencia del Bocashi, gallinaza y su combinación con fertilizantes químicos en la mejora de la fertilidad del suelo y en los rendimientos de maíz (*Zea mays*) San Juan Opico La Libertad. Trabajo de grado. Facultad de Ciencias Agronómicas, Universidad de El Salvador, El Salvador.
- Ramos, E. y D. Zúñiga. 2008. Efecto de la humedad, temperatura y pH del suelo en la actividad microbiana a nivel de laboratorio. *Ecol. Apl.* 7(1-2), 123-130.
- Rao, J., M. Watabe, T.A. Stewart, B.C. Millar y J.E. Moore. 2007. Pelleted organo-mineral fertilisers from composted pig slurry solids, animal wastes and spent mushroom compost for amenity grasslands. *Waste Manage.* 27, 1117-1128. Doi: 10.1016/j.wasman.2006.06.010
- Reyes, A., U. Figueroa, E. Ochoa, J. Verastegui, J.I. Sánchez y G. Núñez. 2012. Lixiviación de nitratos provenientes de estiércol y fertilizante en forrajes cultivados en lisímetros de volumen. *Explotación Racional y Monitoreo de Ecosistemas – Agrofaz* 12 (4), 95-101.
- Xie, L., M. Liu, B. Ni, X. Zhang y Y. Wang. 2011. Slow release nitrogen and boron fertilizer from a functional superabsorbent formulation base on wheat straw and attalulgite. *Chem. Eng. J.* 167, 342-348. Doi: 10.1016/j.cej.2010.12.082
- Yang, J. X. Liu y Y. Shi. 2013. Effect of different mixed fertilizer on yield, quality and economic benefits in *Stevia rebaudiana* Bertoni. *Adv. J. Food Sci. Technol.* 5(5), 588-591.