

Efecto del encalado en el uso eficiente de macronutrientes para cacao (*Theobroma cacao* L.) en la Amazonia colombiana

Liming effect on macronutrient intake for cacao (*Theobroma cacao* L.) in the Colombian Amazon

Gelber Rosas-Patiño,^{1*} Yina Jazbleidi Puentes-Páramo,² Juan Carlos Menjivar-Flores³

¹ Profesor asociado, Universidad de la Amazonía, Facultad de Ingeniería, Programa Ingeniería Agroecológica, Florencia, Colombia.

Correo: g.rosas@udla.edu.co. Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-1044-8103>

² Consultor. Palmira, Colombia.

Correo: yjpuentes@unal.edu.co. Orcid: <https://orcid.org/000-0002-3784-9687>

³ Profesor titular, Universidad Nacional de Colombia, Sede Palmira, Facultad de Ciencias Agropecuarias, Departamento Ciencias Agrícolas. Palmira. Colombia.

Correo: jcmenjivarf@unal.edu.co. Orcid: <https://orcid.org/000-0002-2985-7778>

Editor temático: Jairo Rojas Molina (Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria [AGROSAVIA])

Fecha de recepción: 18/09/2018

Fecha de aprobación: 11/12/2018

Para citar este artículo: Rosas-Patiño, G., Puentes-Páramo, Y. J., & Menjivar-Flores, J. C. (2019). Efecto del encalado en el uso eficiente de macronutrientes para cacao (*Theobroma cacao* L.) en la amazonia colombiana. *Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, 20(1), 05-16

DOI: https://doi.org/10.21930/rcta.vol20_num1_art:1247



Esta licencia permite distribuir, remezclar, retocar, y crear a partir de la obra de modo no comercial, siempre y cuando se dé el crédito y se licencien sus nuevas creaciones bajo las mismas condiciones.

*Autor de correspondencia. Campus Porvenir, calle 17 diagonal 17 con carrera 3F, Florencia, Colombia.

Resumen

En la Amazonia colombiana, el cultivo de cacao (*Theobroma cacao* L.) presenta bajo rendimiento debido a que la alta acidez del suelo limita el uso eficiente de nutrientes. Por lo tanto, esta investigación evalúa el efecto del encalado y la fertilización en un suelo ácido (*Typic Udorthents*) de la Amazonia colombiana sobre el uso eficiente de nutrientes (UEN), en términos de la eficiencia agronómica (EA) y la eficiencia de recuperación del fertilizante (ERF) para nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K), y cuatro clones universales de cacao fino de sabor y aroma. Se utilizó un diseño en bloques completos al azar con arreglo factorial, siendo el factor A cuatro clones (a_1 : ICS-1, a_2 : CCN-51, a_3 : ICS-39, y a_4 : TSH-565) y el factor B cuatro niveles de fertilidad (b_1 : control absoluto; b_2 : suelo 90 días después de encalado (dde); b_3 :

control absoluto más N-P-K, hasta alcanzar los requerimientos del cultivo; b_4 : b_2 más N-P-K, hasta alcanzar los requerimientos del cultivo). Los resultados muestran que el encalado y la fertilización afectaron el UEN y el rendimiento; mientras tanto, el más bajo rendimiento se presentó en b_1 para todos los clones, sugiriendo que la fertilidad del suelo natural no es suficiente para el desarrollo del cultivo de cacao; además, el clon CCN-51 mostró mayor habilidad en el uso de nutrientes que los restantes clones. En este sentido, los cuatro clones respondieron de forma diferencial de acuerdo con la EA y la ERF, evidenciando la influencia del genotipo y de las condiciones edafoclimáticas de la zona, así como las preferencias específicas de pH y nutrientes para cada clon.

Palabras clave: fósforo, nitrógeno, potasio, rendimiento de cultivos, suelo ácido

Abstract

In the Colombian Amazon, cacao tree (*Theobroma cacao* L.) plantations have low yield due to soil acidity which limits the efficient use of nutrients. Therefore, the aim of this study was to evaluate the effect of liming and fertilization in an acid soil (*Typic Udorthents*) of the Colombian Amazon on the efficient use of nutrients in terms of nutrient use efficiency (NUE) and fertilizer recovery efficiency (FRE) for N, P and K, in four universal clones of fine cocoa flavor and bouquet. A completely randomized block design was used using a factorial arrangement, being factor A, four clones (a_1 : ICS-1, a_2 : CCN-51, a_3 : ICS-39, and a_4 : TSH-565) and factor B, four fertility levels (b_1 : absolute control, b_2 : soil 90 days after liming (DAL), b_3 : absolute

control plus N-P-K until reaching the requirements of the crop, and b_4 : b_2 plus N-P-K until reaching the requirements of the crop). Results show that liming and fertilization affect NUE and yield, meanwhile, the lowest yield was found in b_1 for all the clones, suggesting that the natural soil fertility is not sufficient for cacao tree development. Clone CCN-51 was more efficient in the use of nutrients than the other clones, in this sense, the four clones responded differentially according to NUE and FRE, evidencing the influence of the genotype, the edaphoclimatic conditions of the area, as well as specific of pH and nutrient preferences for each clone.

Key words: acid soil, crop yield, nitrogen, phosphorus, potassium

Introducción

En Colombia, los suelos ácidos representan el 85 % de los suelos agrícolas (Casierra & Aguilar, 2007), de los cuales el de la región amazónica representa el 35 % (Quesada et al., 2011), predominando en el departamento del Caquetá, oxisoles, ultisoles y entisoles; este último consiste en suelos muy superficiales, ácidos y con altos contenidos de aluminio (Instituto Geográfico Agustín Codazzi [IGAC], 2014). Sin embargo, y a pesar de que el cultivo de cacao *Theobroma cacao* L. (Malvaceae) es originario de la Amazonia, las plantaciones de cacao presentan bajo rendimiento debido, en gran parte, a la escasa fertilidad y la toxicidad por aluminio (Shamshuddin, Muhrizal, Fauziah, & Husni, 2004). Esta circunstancia se presenta cuando el pH del suelo es inferior a 5,5, lo que indica que una alta proporción de los sitios de intercambio de las arcillas están ocupados por aluminio que generan acidez y limitan la disponibilidad de nutrientes para las plantas (Dahajipour, Ghanati, & Fujiwara, 2011).

Nutrientes como nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K) disminuyen su disponibilidad a medida que el suelo se acidifica (Navarro & Navarro, 2003), como lo corroboran Quinteiro et al. (2013) en un estudio realizado bajo condiciones de invernadero, en el que el incremento de la acidez disminuyó la concentración de N, P y K en la mayoría de los órganos de la planta de cacao.

El encalado es una práctica agrícola importante en suelos ácidos para neutralizar la acidez (Castro & Munevar, 2013); en ese sentido, la adición de cal sube el pH, mejora la absorción y redistribución de N en la planta (Lavres et al., 2010) y libera el fósforo retenido en el suelo (Fisher, Yarwood, & James, 2017; Zhu, Li, & Whelan, 2018). Del mismo modo, Rosas, Puentes y Menjivar (2017) encontraron que el incremento de pH mejora la disponibilidad de P en suelos cacaoteros; por otra parte, Baligar y Fageria (2005) demostraron que el encalado mejora la disponibilidad y absorción de nutrientes en plántulas de cacao, indicando que no solo regula la fitotoxicidad sino también el uso

eficiente de nutrientes (UEN), ya que los suelos ácidos limitan la eficiencia de los fertilizantes, tal y como lo sugieren López, Urbina, Reynoso y Martínez (2018).

Los cambios que se producen por efecto de la modificación de pH influyen en la relación suelo-planta, en los criterios para fertilizar cultivos (Schlindwein & Gianelo, 2004) y en el uso eficiente de nutrientes, bien sea de eficiencia agronómica (aumento del rendimiento por unidad de nutriente aplicado) o de recuperación del fertilizante (capacidad de la planta para tomar nutrientes aplicados al suelo) (Baligar, Fageria, & Hi, 2001). Sin embargo, son escasos los trabajos de investigación en el UEN para cacao (Puentes, Menjivar, & Aranzazu, 2014a; Ribeiro, da Silva, Aitken, Machado, & Baligar, 2008), especialmente bajo la influencia de encalado, aun comprendiendo que el UEN contribuiría para la obtención de mayores rendimientos, la disminución de costos de fertilización y la mitigación de la contaminación ambiental (Kurwakumire et al., 2014). Por lo tanto, esta investigación tiene como objetivo evaluar el efecto del encalado y fertilización de síntesis en un suelo ácido (*Typic Udorthents*) de la Amazonia colombiana, sobre el uso eficiente de nutrientes en términos de la eficiencia agronómica (EA) y la eficiencia de recuperación del fertilizante (ERF), para N, P y K, en clones de cacao fino de sabor y aroma ICS-1, CCN-51, ICS-39 y TSH-565.

Materiales y métodos

La investigación se realizó en Puerto Rico, municipio del departamento del Caquetá, Colombia, en las instalaciones del Jardín Clonal de Cacao, perteneciente a la Asociación Departamental de Productores de Cacao y Especies Maderables del Caquetá (Acamafrut), ubicado geográficamente a 01°52'12" latitud Norte y 75°12'24" longitud Oeste, a 250 msnm. La humedad relativa anual de 84%, temperatura media anual de 25,3 °C, precipitación media anual de 2.960 mm y brillo solar de 4,26 horas/día (Instituto de Hidrología y Estudios Ambientales [IDEAM], 2017).

Se utilizaron cuatro clones universales de cacao fino de sabor y aroma, dos autocompatibles (b_1 : ICS-1, b_2 : CCN-51) y dos autoincompatibles (b_3 : ICS-39, b_4 : TSH-565) con siete años de edad; los materiales autocompatibles estaban establecidos conjuntamente. El ICS-39 se encontraba asociado con IMC-67 y el TSH-565 tenía como material acompañante árboles de IMC-67 e ICS-1. El arreglo espacial consistió en surcos triples de cada clon, a 3 m entre plantas y 3 m entre surcos, en un área de 1,5 ha bajo condiciones agronómicas homogéneas y en sistema agroforestal con surcos simples cada 20 m por 9 m entre árboles, como Abarco (*Cariniana pyriformis* M.) y Nogal (*Cordia alliodora* R. & P.).

El suelo fue caracterizado tanto física como químicamente en el laboratorio de la Universidad de la Amazonia (Rosas et al., 2017); por consiguiente, este suelo fue clasificado como *Typic Udorthents* (Soil Survey Staff, 2010), con una textura franco-arcillo-arenosa (FArA), con predominio de gibsititas ($Al(OH)_3$) (> 50%), caolinitas ($Al_2Si_2O_5(OH)_4$) (entre 15 y 30%) y trazas de micas-goetititas (< 5%); además, cuenta con una profundidad efectiva mayor a 1 m, densidad aparente ($1,173 \text{ g/cm}^3$), porosidad total (55,7%) y resistencia a la penetración de 1,065 MPa, todas estas características físicas no limitantes para el desarrollo del cultivo de cacao (Federación Nacional de Cacaoteros de Colombia [Fedecacao], 2013). Con respecto a las características químicas, este suelo posee pH extremadamente ácido (4,36), con alta saturación de aluminio intercambiable (53,9%), baja capacidad de intercambio catiónico, al igual que de las bases de cambio N (0,13%), P (3,89 mg/kg) y K (0,11 Cmol/kg), correspondiente a N, P_2O_5 , K_2O , con 11,2, 10 y 60 kg/ha, respectivamente. Esto indica que las condiciones químicas del suelo no son ideales para la producción de cacao (Fedecacao, 2013), lo que sugiere un manejo agronómico específico. Estas características físicas y químicas fueron normales para la zona de acuerdo con Rosas, Rodríguez y Muñoz (2012).

Para corregir el pH, se adicionó al suelo 7 ton/ha de cal dolomita [$CaMg(CO_3)_2$], con un poder relativo de neutralización total de 78,4%, dosis

requerida para elevar el pH a un valor \geq a 5,5 (Rosas et al., 2017). La incorporación de cal se realizó al iniciar la época lluviosa (mayo) en la zona de plateo ($4,5 \text{ m}^2$ aproximadamente) de los árboles de cacao en forma homogénea con un cernidor. Posteriormente, 90 dde se tomaron seis muestras de suelo, conformadas cada una por cuatro submuestras equidistantes en la zona del plato, a un metro de distancia del árbol (Sadeghian, 2011) y a 30 cm de profundidad, dado que la mayoría de las raíces del árbol de cacao que absorben nutrientes se encuentran a esta profundidad (Aikpokpodion, 2010). Las muestras se analizaron en el laboratorio del Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) para la determinación de pH en agua (1:2) (potenciómetro), N (Kjeldahl), P (colorimetría) y K (absorción atómica).

A partir de la disponibilidad de N-P-K del suelo con y sin encalar, se establecieron cuatro niveles de fertilidad así: b_1 : suelo con fertilidad natural sin encalado; b_2 : b_1 encalado con disponibilidad de nutrientes 90 dde; b_3 : b_1 fertilizado con aplicación de N-P-K hasta alcanzar los requerimientos del cultivo propuestos por Puentes et al. (2014a); b_4 : b_2 fertilizado con aplicación de N-P-K hasta alcanzar los requerimientos del cultivo (tabla 1). La incorporación de N-P-K se fraccionó en dos aplicaciones al año: la primera, en marzo-abril, y la segunda, (agosto) en plena floración del cultivo, utilizando urea $CO(NH_2)_2$ (46-00-00), fosfato monopotásico KH_2PO_4 (00-52-34) y cloruro de potasio KCl (00-00-60) como fuentes de fertilización.

Se utilizó un diseño de bloques completos al azar en arreglo factorial con cuatro repeticiones. El factor A correspondió a cuatro clones y el factor B a los niveles de fertilidad para un total de 16 unidades experimentales; cada unidad experimental estuvo compuesta por cuatro árboles de cacao por clon (TSH-565, ICS-39, ICS-1 y CCN-51). Con el fin de garantizar la respuesta de los clones, se suprimió la fertilización un año antes de establecer el experimento y se realizaron podas, y control manual de plagas y enfermedades; asimismo, se eliminaron los frutos existentes con el propósito de uniformizar la producción, como lo sugieren Puentes et al. (2014a).

Tabla 1. Descripción de los niveles de fertilidad

Niveles de fertilidad B	Cal	N	P ₂ O ₅	K ₂ O
	kg/ha			
b ₁ : Control absoluto	0,0	11,2	10,0	60,0
b ₂ : b ₁ + Cal (90 dde)	7.000,0	15,6	22,6	43,8
b ₃ : b ₁ + Fertilizante	0,0	73,0	35,2	219,7
b ₄ : b ₂ + Fertilizante	7.000,0	73,0	35,2	219,7

dde: días después de enclado; N: nitrógeno; P₂O₅: pentóxido de fósforo; K₂O: óxido de potasio.
Fuente: Elaboración propia

Para determinar el contenido de N-P-K en grano, se colectaron cinco mazorcas maduras y sanas en cada árbol por clon. Los granos se extrajeron de forma manual, se secaron en estufa a 103 °C durante 24 horas, se molieron y, posteriormente, se analizó el contenido de N por Kjeldahl, P por colorimetría y K por absorción atómica. El rendimiento (kg/ha) para el año cacaotero 2016-2017 se estimó a partir de la relación entre el número promedio de mazorcas por árbol e índice de mazorca (IM),

es decir, el número de mazorcas para obtener un kilogramo de grano seco de cacao, multiplicada por la densidad de siembra (1.111 plantas/ha).

Con los datos de rendimiento y contenido de N-P-K en grano seco de cacao, se determinó la EA y la ERF para cada nutriente, por nivel de fertilidad y tipo de clon, siguiendo las fórmulas (1 y 2) de acuerdo con Puentes et al. (2014a):

$$EA \text{ (kg/kg)} = \frac{\text{Rendimiento F} - \text{Rendimiento C}}{\text{Cantidad nutriente aplicado al suelo}} \quad (1)$$

$$ERF \text{ (\%)} = \frac{\text{Nutriente en grano F} - \text{Nutriente en grano C} \times 100}{\text{Cantidad nutriente aplicado al suelo}} \quad (2)$$

Donde F = variable en nivel de fertilidad diferente al b₁ y C = variable en el control o b₁.

El análisis estadístico consistió en un análisis de varianza por efecto del tipo de clon, nivel de fertilidad e interacción, y cuando hubo diferencias significativas se realizó comparación de promedios mediante la prueba de Tukey ($p \leq 0,05$), además de regresiones mediante el software SAS 9.4 (SAS, 2014).

Resultados y discusión

Análisis de suelo experimental

El análisis químico del suelo experimental (Rosas et al., 2017) a los 90 dde presentó pH moderadamente

ácido (5,91), N (0,08 %), P (9,53 mg/kg) y K (0,08 Cmol/kg), correspondientes a N, P₂O₅ y K₂O, con 15,6, 22,6 y 43,8 kg/ha, respectivamente, considerados valores coherentes con el aumento de pH, como lo sugiere Kass (1998).

Rendimiento

En el análisis de varianza se presentaron diferencias altamente significativas ($p \leq 0,01$) por efecto de la interacción clon*nivel de fertilidad, del clon y del nivel de fertilidad (tabla 2).

Tabla 2. Análisis de varianza para la variable rendimiento de cacao en un *Typic Udorthents* del Caquetá

Fuente de variación	Rendimiento
Clon	0,000**
Nivel de fertilidad	0,000**
Clon*Nivel de fertilidad	0,000**

** Diferencias altamente significativas ($p \leq 0,01$)

Fuente: Elaboración propia

El rendimiento más bajo se presentó en el b₁ para todos los clones, en el siguiente orden de mayor a menor: CCN-51 (3.535 kg/ha), ICS-1 (1.667 kg/ha), ICS-39 (1.222 kg/ha) y TSH-565 (1.178 kg/ha). Similares resultados obtuvieron Puentes et al. (2014a), lo que sugiere que la fertilidad del suelo natural no es suficiente para el desarrollo del cultivo de cacao, además de que la acidez del suelo es limitante, como lo sostienen López et al. (2018). El mayor rendimiento se obtuvo en CCN-51 con b₂ (4.100 kg/ha), mostrando superioridad con respecto a los demás clones y evidenciando la influencia del encalado, como lo sugieren Baligar y Fageria (2005); le sigue el clon ICS-1 (3.855 kg/ha) y TSH-565 (2.944 kg/ha) en b₃, indicando la importancia de la fertilización en suelos ácidos (Koko, 2014) y, por último, ICS-39 en b₄ (2.033 kg/ha), lo que expresa su mayor potencial cuando el suelo se encaló y fertilizó (figura 1); sin embargo, su bajo rendimiento se asocia con la condición autoincompatible de acuerdo con Mora, Burbano y Ballesteros (2011), quienes sostienen que afecta la polinización y, por lo tanto, el cuajado de frutos.

En términos generales, los clones presentaron comportamientos diferenciados por efecto de los niveles de fertilidad; asimismo, los rendimientos

fueron superiores al compararlos con los reportados por Puentes et al. (2014a) y Fedecacao (2013), en parte debido a la mayor densidad de siembra utilizada con respecto a las referencias, como también a la interacción del tipo de clon con las condiciones contrastantes de suelo y clima de la Amazonia, y de la fertilización, siendo evidente la influencia del genotipo, como lo sugieren Romero, Puentes y Menjivar (2016).

Eficiencia agronómica

La eficiencia agronómica para nitrógeno (EAN), para fósforo (EAP) y para potasio (EAK), por efecto del clon, nivel de fertilidad e interacción, mostró diferencias altamente significativas ($p \leq 0,01$). La mayor EAN se presentó en la combinación CCN-51 y b₂ (36,33 kg/kg), es decir, el rendimiento aumentó 36,33 kg por cada kilogramo de nitrógeno aplicado; le sigue el clon ICS-1 (29,83 kg/kg) y TSH-565 (24,10 kg/kg) en b₃, e ICS-39 (11,27 kg/kg) en b₄, superando los valores obtenidos por Puentes et al. (2014a) en 123 %, 368 % y 103 % para CCN-51, TSH-565 e ICS-39, respectivamente, sugiriendo una mayor eficiencia con menor dosis de nitrógeno para CCN-51 e influencia de las condiciones edafoclimáticas y genotipo, como lo sugieren

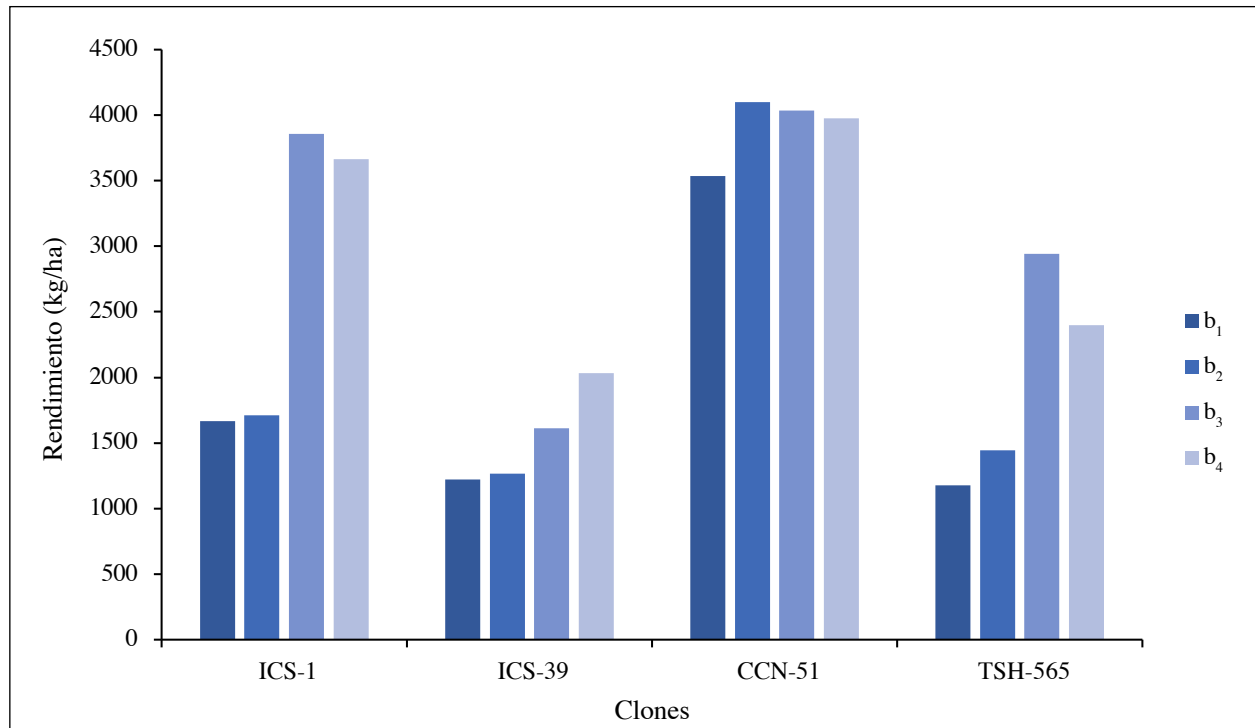


Figura 1. Rendimiento de grano seco de cacao (kg/ha) para el año cacaotero 2016-2017. Valores medios con igual letra por clon no difieren estadísticamente, según la prueba de Tukey ($p \leq 0,05$).

Fuente: Elaboración propia

Romero et al. (2016). Las menores EAN en orden de mayor a menor se presentaron en el clon TSH-565 (2,80 kg/kg) en b₄ y los clones ICS-39 (2,93 kg/kg) e ICS-1 (16,87 kg/kg) en b₂, seguido de CCN-51 (6,87 kg/kg) en b₂, seguido de CCN-51 (6,87 kg/kg) en b₂ y los clones ICS-39 (2,93 kg/kg) e ICS-1 (16,87 kg/kg) en b₂, seguido de CCN-51 (6,87 kg/kg) en b₂ (figura 2).

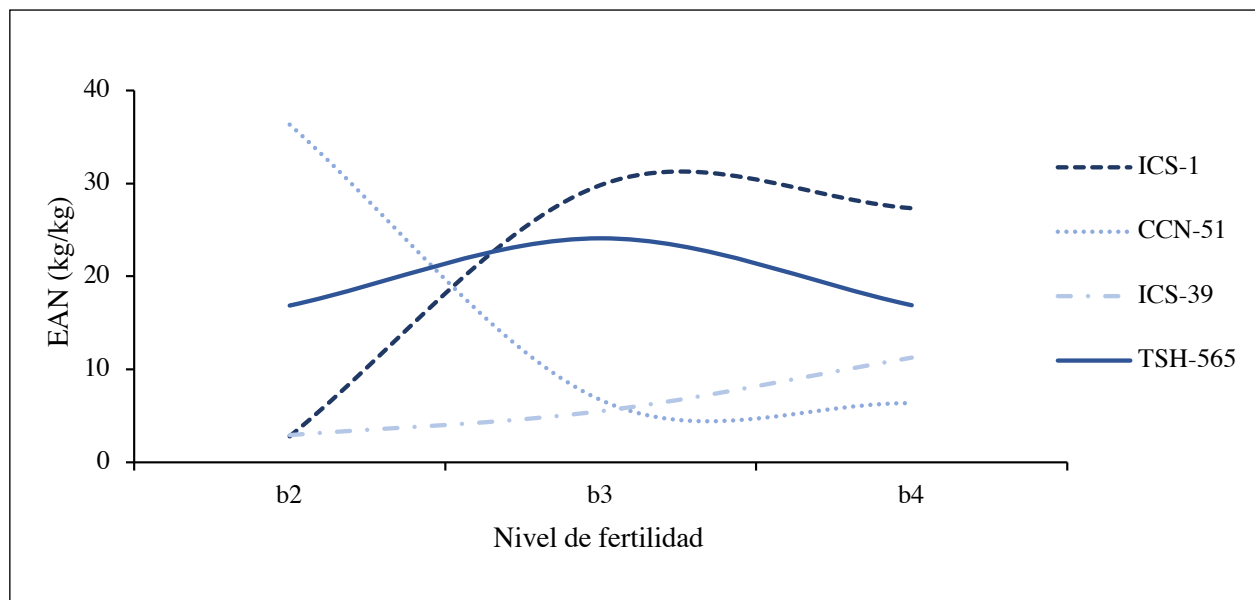


Figura 2. Eficiencia agronómica de nitrógeno en cuatro clones de cacao.

Fuente: Elaboración propia

El clon CCN-51 presentó tanto la mayor EAN como rendimiento en b_2 y los menores valores en b_4 , siendo consecuente con los rendimientos de cosecha. Los genotipos eficientes en el uso del N son más productivos (Ribeiro et al., 2008), como también a mayor dosis nutrimental se disminuye el uso eficiente de nutrientes (Puentes, Menjivar, & Ortiz, 2016).

Con respecto a la EAP (figura 3), los clones ICS-1 (61,73 kg/kg) y TSH-565 (49,53 kg/kg)

mostraron el mayor valor en b_3 , indicando el efecto de la fertilización sobre la EAP como lo sustentan Díaz et al. (2014); luego siguen CCN-51 (25,17 kg/kg) en b_2 e ICS-39 (22,80 kg/kg) en b_4 . Las menores EAP se obtuvieron en ICS-1 (2,00 kg/kg) e ICS-39 (2,03 kg/kg) en b_2 , CCN-51 (13,53 kg/kg) en b_4 y TSH-565 (12,03 kg/kg) en b_2 , valores que estuvieron por encima de los reportados por Puentes et al. (2014a), lo que evidencia, entre otras cosas, la adaptación del cultivo a la zona, siendo originario de la Amazonia (Shamshuddin et al., 2004).

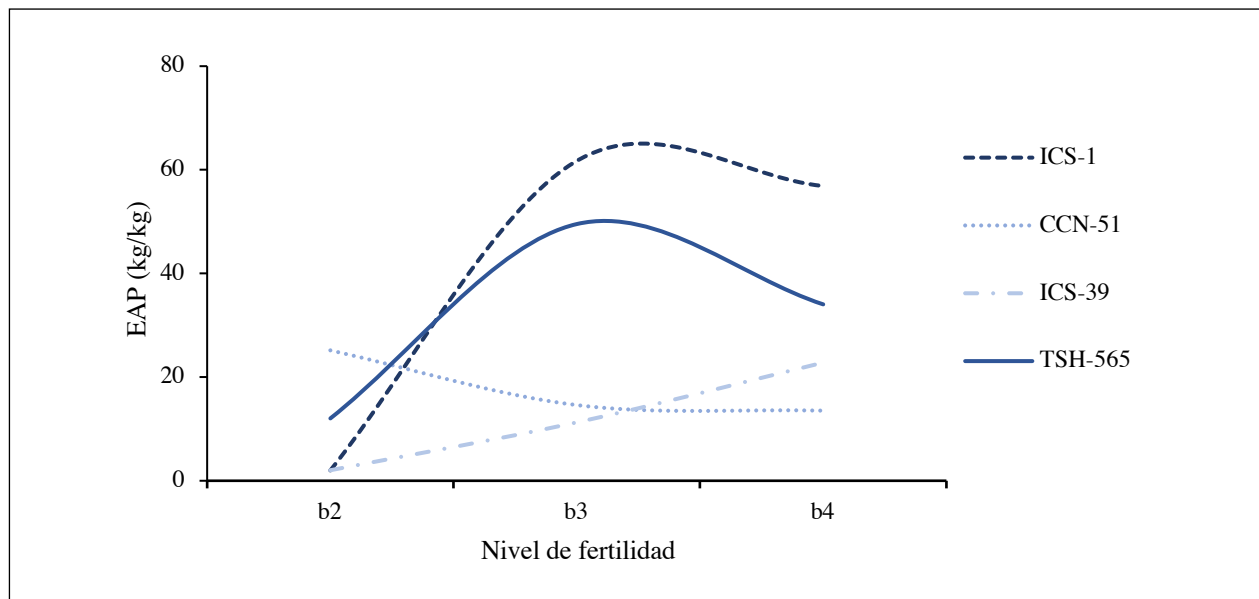


Figura 3. Eficiencia agronómica de fósforo en cuatro clones de cacao.

Fuente: Elaboración propia

Los clones presentaron similar respuesta comparada con la EAN; no obstante, es importante resaltar que, a pesar de que el fósforo es liberado por el encalado (Zhu & Whelan, 2018), no fue suficiente para obtener mayor eficiencia en la mayoría de los clones excepto para CCN-51, evidenciando el efecto del genotipo de acuerdo con Romero et al. (2016).

Para la eficiencia agronómica de potasio (figura 4), al igual que en las anteriores, CCN-51 presenta el mayor valor en b_2 , aumentando el rendimiento en

12,57 kg por cada kg de fertilizante (K) aplicado; luego se encuentran el ICS-1 (9,70 kg/kg), TSH-565 (8,27 kg/kg) en b_3 e ICS-39 (3,77 kg/kg) en b_4 . El menor valor de EAK se dio para el ICS-39 (1,70 kg/kg) e ICS-1 (2,20 kg/kg) en b_2 , seguido de CCN-51 (2,53 kg/kg) y TSH-565 (5,53 kg/kg) en b_4 . Estos valores superaron los reportados por Puentes et al. (2014a), debido a la ausencia de illitas (atrapan K) en las arcillas de este suelo, así como a la edad del cultivo, como lo sugieren Cabala, Miranda y Prado (1969).

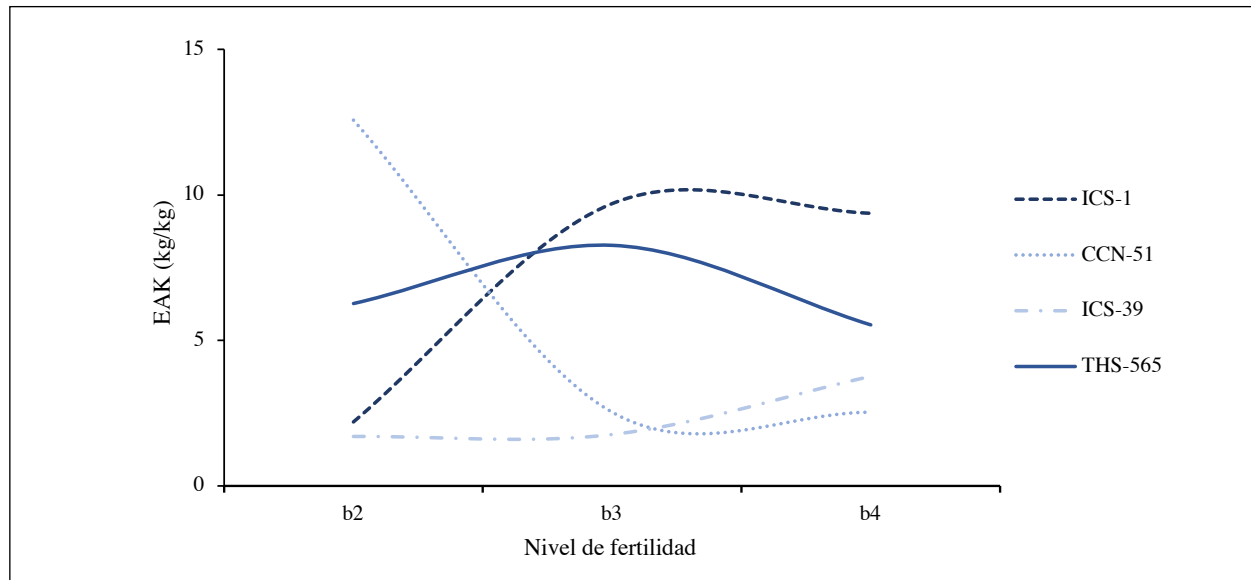


Figura 4. Eficiencia agronómica de potasio en cuatro clones de cacao.

Fuente: Elaboración propia

Las eficiencias agronómicas para N-P-K fueron diferentes, mostrando la variabilidad de los clones en respuesta a los niveles de fertilidad, como lo corroboran Puentes et al. (2014a). En ese sentido, CCN-51 presentó mayor habilidad en la absorción de nutrientes que los restantes clones, con la preferencia de mayor pH del suelo (moderadamente ácido), mientras que ICS-1 y TSH-565 requirieron mayor cantidad de nutrientes para expresar su potencial sin importar el pH (extremadamente ácido) y a su vez el clon ICS-39, con igual cantidad de nutrientes que los anteriores clones, prefirió menor acidez.

Por otra parte, las EA, en orden de mayor a menor aporte al rendimiento por cada kg de fertilizante en cada clon, fueron las siguientes: $P > N > K$ para los clones ICS-1, ICS-39 y TSH-565, y $N > P > K$, para CCN-51, coincidiendo en K como el nutriente que aportó menos al incremento del rendimiento.

Eficiencia de recuperación del fertilizante

En el análisis de varianza, la eficiencia de recuperación del fertilizante para nitrógeno (ERFN), para fósforo (ERFP) y para potasio (ERFK) mostró diferencias altamente significativas ($p \leq 0,01$), por efecto del clon, niveles de fertilidad y su la interacción.

Con respecto a la ERFN (tabla 3), la mayoría de los clones mostraron similar respuesta a los niveles de fertilidad que, para la EAN, excepto para el clon TSH-565, con el que se obtuvo el mayor valor de ERFN en b_2 y el menor en b_4 , lo que indica que, a pesar de haber obtenido la mayor ERF de nitrógeno en b_2 , no se reflejó en mayor rendimiento, contrario a lo que sucede en b_4 . Similares resultados encontraron Puentes et al. (2014a), aunque estos valores de ERFN estuvieron por encima de los reportados. La mayor ERFN se obtuvo en ICS-1 en b_3 , mientras que la menor se obtuvo en CCN-51 en b_4 . Las eficiencias con valores altos para ICS-1 y TSH-565, en contraste con los bajos para CCN-51 e ICS-39 cuando se fertiliza (b_3 y b_4), concuerdan con los reportes de Baligar et al. (2001), lo que demuestra la mayor habilidad en el uso de nitrógeno del clon CCN-51.

La ERFP (tabla 3) registró los mayores valores en el clon ICS-1, mostrando que del 100% de la aplicación de fósforo se recuperó el 30% y el 33% (para b_4 y b_3 , respectivamente), superando los reportes de Baligar et al. (2001). A pesar de que TSH-565 y ICS-39 presentaron sus mejores ERFP cuando se incorporó el nutriente, estuvieron por debajo de ICS-1 y de los valores alcanzados por Puentes et al. (2014a). CCN-51 registró su mayor ERFP con la cantidad de fósforo liberado a

Tabla 3. Eficiencia de recuperación del fertilizante para nitrógeno, fósforo y potasio en cuatro clones de cacao

Clon	ERFN (%)			ERFP (%)			ERFK (%)		
	b ₂	b ₃	b ₄	b ₂	b ₃	b ₄	b ₂	b ₃	b ₄
ICS-1	12,67c	65,60a	61,97b	4,27c	33,37a	30,20b	1,30c	16,63a	10,53b
CCN-51	23,33a	7,97b	5,83c	15,43a	8,87c	9,87b	2,93b	4,53a	1,87c
ICS-39	9,53c	13,87b	26,13a	1,87b	1,60c	12,13a	14,20a	3,97c	5,47b
TSH-565	56,40a	54,90b	45,43c	6,80c	14,03a	12,53b	4,87b	8,10a	2,30c

Nota: Valores medios con igual letra por clon y ERF no difieren estadísticamente según la prueba de Tukey ($p \leq 0,05$).

Fuente: Elaboración propia

la solución por efecto del encalado. Entre tanto, tener una mayor eficiencia de uso del fósforo no es tan fácil, ya que depende de la humedad del suelo, dado que es un nutriente que se mueve por difusión (Malavolta, Vitty, & Oliveira, 1997) del pH ($> 5,5$), como también de la morfología del sistema radical de la planta (Anghinoni, Volkart, Fattore, & Ernani, 1989).

La ERFK (tabla 3) mostró el mayor valor en el clon ICS-1 en b₄ y b₃, respectivamente, al igual que para las ERF de N y P, lo que demuestra que este clon responde positivamente a la fertilización con potasio, seguido por ICS-39 al alcanzar los mayores niveles de recuperación en b₂. Por otra parte, TSH-565 y CCN-51 presentaron los niveles más bajos en la recuperación de potasio. Estos valores se consideran bajos, con respecto a lo reportado por Baligar et al. (2001), y altos, comparados con Puentes et al. (2014a), argumentado por la ausencia de illitas en la arcilla del suelo experimental.

En general, las ERF, en orden de mayor a menor recuperación del fertilizante (N-P-K) para cada uno de los clones, fueron las siguientes: N > P > K para ICS-1, CCN-51, TSH-565, coincidiendo con Puentes, Menjivar, Gómez y Aranzazu (2014b), y N > K > P, para ICS-39, siendo coherente con el bajo rendimiento que presentó este clon, dado que el fósforo es un nutriente que se acumula especialmente en la semilla (Marshner, 1995).

Conclusiones

La acidez del suelo de la Amazonia colombiana es una condición desfavorable para el rendimiento de los clones de cacao ICS-1, CCN-51, ICS-39 y TSH-565, por lo que es necesario encalar o fertilizar teniendo en cuenta las preferencias edáficas para cada clon, sean de pH o nutrientes. De estos genotipos, el clon CCN-51 muestra mayor habilidad en el uso de nutrientes que los restantes clones, reflejada en presentar alto rendimiento con menor cantidad de nutrientes; en este sentido, los cuatro clones responden de forma diferencial de acuerdo con la eficiencia agronómica y eficiencia de recuperación del fertilizante, evidenciando la influencia del genotipo y de las condiciones edafoclimáticas propias de la zona.

Agradecimientos

Los autores expresan su gratitud a la Asociación Departamental de Productores de Cacao y Especies Maderables del Caquetá (Acamafrut) y a la Universidad de la Amazonia por su apoyo para realizar esta investigación.

Descargos de responsabilidad

Los autores están de acuerdo con la publicación del presente artículo y declaran que no existe ningún conflicto de interés que afecte los resultados.

Referencias

- Aikpokpodion, P. E. (2010). Nutrients Dynamics in Cocoa Soils, Leaf and Beans in Ondo State, Nigeria. *Journal of Agricultural Sciences*, 1(1), 1-9. doi:10.1080/09766898.2010.11884647.
- Anghinoni, I., Volkart, C. R., Fattore, N., & Ernani, P. R. (1989). Morfología de raíces e cinética da absorção de nutrientes em diversas especies e genotipos de plantas. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 13, 355-361.
- Baligar, V. C., Fageria, N. K., & He, Z. L. (2001). Nutrient use efficiency in plants. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 32(7), 921-950. doi:10.1081/CSS-100104098.
- Baligar, V. C., & Fageria, N. K. (2005). Aluminum influence on growth and uptake of micronutrients by cacao. *Journal of food agriculture and environment*, 3(3-4), 173-177.
- Cabala, R. P., Miranda, E. D., & Prado, E. P. (1969). *Efeito da remoção de sombra e da aplicação de fertilizantes sobre a produção do cacauero na Bahia*. Documento presentado en 3rd International Cocoa Research Conference. Tafo, Ghana.
- Casierra, P. F., & Aguilar, A. O. (2007). Stress for aluminum in plants: reactions in the soil, symptoms in plants and amelioration possibilities. A review. *Colombian Journal of Horticultural Science*, 1(2), 246-257.
- Castro, H., & Munevar, O. (2013). Mejoramiento químico de suelos ácidos mediante el uso combinado de materiales encalantes. *Revista UDCA. Actualidad & Divulgación Científica*, 16(2), 409-416.
- Dahajipour, M., Ghanati, F., & Fujiwara, T. (2011). Interaction between boron and aluminum and their effects on phenolic metabolism of *Linum usitatissimum* L. roots. *Plant Physiology and Biochemistry*, 49, 1377-1383. doi:10.1016/j.plaphy.2011.09.008.
- Díaz, L. E., Loeza, C. J. M., Brena, H. I., Campos, P. J. M., Orlando, G., I. J., & Salgado, B. G. (2014). Eficiencia agronómica del fósforo, biomasa y rendimiento de dos variedades nativas de maíz y un híbrido en el centro de México. *Fyton*, 83, 171-178.
- Federación Nacional de Cacaoteros de Colombia (Fedecacao). (2013). *Guía Ambiental para el Cultivo del cacao* (2^a ed). Bogotá, Colombia: autor.
- Fisher, K. A., Yarwood, S. A., & James B. R. (2017). Soil urease activity and bacterial ureC gene copy numbers: Effect of pH. *Geoderma*, 285, 1-8. doi:10.1016/j.geoderma.2016.09.012.
- Instituto de Hidrología y Estudios Ambientales (IDEAM). (2017). *Indicadores climáticos*. Recuperado de <http://institucional.ideam.gov.co/jsp/1772>.
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC). (2014). *Estudio general de suelos y zonificación de tierras: departamento de Caquetá. Escala 1:100.000*. Bogotá, Colombia: Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC).
- Kass, D. C. L. (1998). *Fertilidad de suelos*. San José, Costa Rica: Editorial de la Universidad Estatal a Distancia (EUNED).
- Koko, L. (2014). Teractiv Cacao as a new fertilizer based Reactive Phosphate Rock for cocoa productivity in Côte d'Ivoire: A participatory approach to update fertilization recommendation. *Procedia Engineering*, 83, 348-353. doi:10.1016/j.proeng.2014.09.027.
- Kurwakumire, N., Chikowo, R., Mtambanengwe, F., Mapfumo, P., Snapp, S., ... Zingore, S. (2014). Maize productivity and nutrient and water use efficiencies across soil fertility domains on smallholder farms in Zimbabwe. *Field Crops Research*, 164, 136-147. doi:10.1016/j.fcr.2014.05.013.
- Lavres, J. J., Reis, A. R., Rossi, M. L., Cabral, C. P., Nogueira, N. L., & Malavolta, E. (2010). Changes in the ultrastructure of soybean cultivars in response to manganese supply in solution culture. *Scientia Agricola*, 67, 287-294. doi:10.1590/S0103-90162010000300006.
- López, B. W., Urbina, H. L.H., Reynoso, S. R., & Martínez, S. J. (2018). Efectos del encalado en suelo ácido cultivado con café (*Coffea arabica* L.) en la reserva de la biosfera el triunfo, Chiapas, México. *Agroproductividad*, 11(4), 55-60.
- Malavolta, E., Vitty, G. C., & de Oliveira, S. A. (1997). *Avaliação do estado nutricional das plantas. Princípios e aplicações* (2^a ed.). Piracicaba, Brasil: Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato.
- Marschner, H. (1995). *Mineral nutrition of higher plants* (2^a ed.). Nueva York, EE. UU.: Academic Press.
- Mora, R. J., Burbano, O. H., & Ballesteros, P. W. (2011). Efecto de la fertilización con diversas fuentes sobre el rendimiento de cacao. *Revista de Ciencias Agrícolas*, 28(2), 81-94.
- Navarro, B. S., & Navarro, G. G. (2003). *Química agrícola: El suelo y los elementos químicos esenciales para la vida vegetal* (2^a ed.). Madrid, España: Ediciones Mundi-Prensa.
- Puentes, P. Y. J., Menjivar, F. J. C., & Ortíz, C. A. M. (2016). Eficiencia fisiológica de uso de NPK en clones autoincompatible y autocompatible de cacao (*Theobroma cacao* L.) en Colombia. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 7(1), 17-24.
- Puentes, P. Y. J., Menjivar, F. J. C., & Aranzazu, F. (2014a). Eficiencia en el uso de nitrógeno, fósforo y potasio en clones de cacao (*Theobroma cacao* L.). *Bioagro*, 26(2), 99-106.
- Puentes, P. Y. J., Menjivar, F. J. C., Gómez, A., & Aranzazu F. (2014b). Absorción y distribución de nutrientes en clones de cacao y sus efectos en el rendimiento. *Acta Agronómica*, 63(2), 145-152. doi:10.15446/acag.v63n2.40041.

- Quesada, C. A., Lloyd, J., Anderson, L. O., Fyllas, N. M., Schwarz, M., & Czimczik, C. I. (2011). Soils of Amazonia with particular reference to the RAINFOR sites. *Biogeosciences*, 8, 1415–1440. Recuperado de <https://www.biogeosciences.net/8/1415/2011/bg-8-1415-2011.pdf>.
- Quinteiro, M., Furtado, A., Schramm, M., Pinto, F., Viana, M., & Baligar V. C. (2013). Aluminum effects on growth photosynthesis and mineral nutrition of cacao genotypes. *Journal of Plant Nutrition*, 36(8), 1161-1179. doi:10.1080/01904167.2013.766889.
- Ribeiro, M. A., da Silva, J. O., Aitken, W. M., Machado, R. C. R., & Baligar, V. C. (2008). Nitrogen use efficiency in cocoa genotypes. *Journal of Plant Nutrition*, 31, 239-249. doi:10.1080/01904160701853720.
- Romero, L. M. P., Puentes, P. Y. J., & Menjivar, F. J. C. (2016). Eficiencia de uso de nutrientes en ají tabasco (*Capsicum frutescens* L.) y habanero (*Capsicum chinense* Jacq). *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 7(2), 121-127. doi:10.22490/21456453.1562.
- Rosas P. G., Puentes, P. Y. J., & Menjivar, F. J. C. (2017). Relación entre el pH y la disponibilidad de nutrientes para cacao en un entisol de la Amazonia colombiana. *Corpoica Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, 18(3), 529-541. doi:10.21930/rcta.vol18_num3_art:742.
- Rosas, P. G., Rodríguez, P. W., & Muñoz, R. J. (2012). Caracterización edafológica de lomeríos bajo sistema agroforestal y rastrojo en el Centro de Investigaciones Amazónicas Macagual, Caquetá-Colombia. *Momentos de Ciencia*, 9(2), 153-161.
- Sadeghian, S. (2011). Respuesta de cafetales al sol y bajo semisombra a nitrógeno y su relación con la materia orgánica del suelo. *Revista Facultad Nacional de Agronomía-Medellín*, 64(1), 5781-5791.
- SAS. (2014). *User's guide: Statistics*, Release 9.4. Cary, EE. UU.: Statistical Analysis System STAT Software.
- Schindwein, J. A., & Gianello, C. (2004). Necessidades de novos estudos de calibração e recomendação de fertilizantes para as culturas cultivadas sob plantio direto. *Revista Plantio Direto*, 79, 12-15.
- Shamshuddin, J., Muhrizal, S., Fauziah, I., & Husni A. (2004). Effects of adding organic materials to an acid sulfate soil on the growth of cocoa (*Theobroma cacao* L.) seedlings. *Science of the Total Environment*, 323, 33-45. doi:10.1016/j.scitotenv.2003.10.003.
- Soil Survey Staff. (2010). *Keys to Soil Taxonomy* (11^a ed.). Washington, EE. UU.: United States Department of Agriculture (USDA), Natural Resources Conservation Service (NRCS).
- Zhu, J., Li, M., & Whelan, M. (2018). Phosphorus activators contribute to legacy phosphorus availability in agricultural soils: A review. *Science of the Total Environment*, 612, 522-537. doi:10.1016/j.scitotenv.2017.08.095.