



Mejoramiento químico de suelos ácidos con enmiendas calcáreas en el cultivo de rambután, Honduras*

Chemical improvement of acid soils with the use of calcareous amendments in rambutan cultivation, Honduras

Breno Augusto Sosa-Rodríguez¹, Jesús Alexis Rodríguez-Matute¹, Marden Daniel Espinoza-Guardiola¹, Yuly Samanta García-Vivas¹, Johnny Pérez-Nuñez¹

* Recepción: 14 de enero, 2025. Aceptación: 27 de marzo, 2025. El proyecto formó parte del programa de investigación: manejo de suelos ácidos del litoral atlántico hondureño, que promueve el grupo de investigación del departamento de suelos de la Universidad Nacional Autónoma de Honduras (UNAH).

¹ Universidad Nacional Autónoma de Honduras. La Ceiba, Honduras. breno.sosa@unah.edu.hn (Autor para correspondencia; <https://orcid.org/0000-0001-7506-797X>); jesus.rodriguez@unah.edu.hn (<https://orcid.org/0000-0003-2758-6083>); marden.espinoza@unah.edu.hn (<https://orcid.org/0000-0001-6270-7173>); yuly.garcia@unah.edu.hn (<https://orcid.org/0000-0003-1396-3829>); johnny.perez@unah.edu.hn (<https://orcid.org/0009-0009-4831-837X>).

Resumen

Introducción. La acidez del suelo genera toxicidad por altas concentraciones del aluminio y baja disponibilidad de macronutrientes en el cultivo de rambután, provocando altos costos de producción al momento de corregirla con fertilizantes sintéticos y correctivos alcalinos. **Objetivo.** Mejorar indicadores de la acidez del suelo mediante el uso de dos enmiendas calcáreas en el rambután. **Materiales y métodos.** Se realizó un ensayo entre marzo y noviembre de 2023 en condiciones de campo en finca de productor en el municipio de San Francisco, Atlántida, Honduras. Se evaluaron dosis crecientes (0, 1, 2 y 3 Mg ha⁻¹) de dos enmiendas calcáreas: cal agrícola con 34,3 % Ca y 0,3 % Mg (CA) y calcita con 25,5 % Ca y 1,2 % Mg (CAL). Se utilizó bajo un diseño de bloques completos al azar con arreglo factorial 4x4 y tres repeticiones, lo que da lugar a 16 tratamientos. Se midieron en cinco ocasiones, el pH, aluminio intercambiable (Al³⁺), acidez intercambiable (Al³⁺+H⁺) y H⁺ en el suelo. **Resultados.** El uso individual de cada enmienda estimuló la corrección de los indicadores de acidez evaluados, la mejor dosis fue 3 Mg ha⁻¹. El pH del suelo aumentó con el incremento de las dosis de los dos materiales encalantes, donde la mayor dosis (6 Mg ha⁻¹) combinando ambas enmiendas mostró la mejor respuesta. Las concentraciones de H⁺, Al³⁺ y Al³⁺+ H⁺ disminuyeron a medida que aumentaban las dosis del encalado, y se registró un efecto similar al usar 3 hasta 6 Mg ha⁻¹. En los parámetros analizados los mejores resultados, excepto H⁺, con cambios significativos se registraron en el cuarto muestreo, seis meses después de la aplicación con CA. **Conclusiones.** Las dosis crecientes de ambas enmiendas calcáreas redujeron los indicadores de la acidez del suelo en el cultivo de rambután, la cal agrícola brindó mejor control.

Palabras clave: Encalado, acidez del suelo, aluminio intercambiable, carbonato de calcio.

Abstract

Introduction. The acidity of the soil generates toxicity due to high concentrations of aluminum and low availability of macronutrients in rambutan cultivation, causing high production costs when correcting with synthetic



fertilizers and alkaline correctives. **Objective.** To improve indicators of soil acidity using two calcareous amendments in the rambutan crop. **Materials and methods.** A trial was carried out between March and November 2023 under field conditions on a producer's farm in the municipality of San Francisco, Atlántida, Honduras. Increasing doses (0, 1, 2 and 3 Mg ha⁻¹) of two types of calcareous amendments: agricultural lime with 34,3 % Ca and 0,3 % Mg (AC) and calcite 25,5 % Ca y 1,2 % Mg (CAL), were evaluated. A randomized complete block design with a 4x4 factorial arrangement and three repetitions was used, giving rise to 16 treatments. The pH, exchangeable aluminum (Al³⁺), exchangeable acidity (Al³⁺+H⁺) and H⁺ were measured in the soil, on five occasions. **Results.** The individual use of each amendment stimulated the correction of the acidity indicators evaluated, the best dose was 3 Mg ha⁻¹. The pH of the soil increased as the doses of the two liming materials increased, where the highest dose (6 Mg ha⁻¹) combining both amendments showed the best response. The concentrations of H⁺, Al³⁺ and Al³⁺+ H⁺ decreased as liming doses increased, recording a similar effect when using 3 to 6 Mg ha⁻¹. In almost all the parameters analyzed, except for H⁺, significant changes were recorded until the fourth sampling, six months after the lime application, with CA showing slightly better results. **Conclusions.** Increasing doses of both calcareous amendments reduce the indicators of soil acidity in rambutan cultivation, agricultural lime provided better control.

Keywords: Liming, soil acidity, exchangeable aluminum, calcium carbonate.

Introducción

Cerca del 70 % de los suelos a nivel mundial aptos o con potencial para la producción de alimentos son ácidos. Una de las causas de esta condición es la alta concentración de aluminio intercambiable (Al³⁺), que limita el crecimiento de las plantas por su toxicidad. Además, afecta la disponibilidad de nutrientes en el suelo, como fósforo, calcio y magnesio (Muhammad et al., 2019).

La acidez en Oxisoles es común en zonas con el clima tropical húmedo y alta precipitación, como el litoral caribe de Honduras, donde se registra anualmente 2900 a 3200 mm en las zonas que se han establecido aproximadamente 3000 hectáreas de rambután. En estas plantaciones, predominan valores de pH de 4,5 a 5,0, con concentraciones de Al³⁺ mayores de 3 mg kg⁻¹, en plantaciones de diferentes edades, de 2 a 15 años (Sosa-Rodrigues & García-Vivas, 2020). La acidificación también inhibe la actividad microbiana en el suelo, esto reduce la abundancia y diversidad de microorganismos (Wan et al., 2020), lo cual afecta la sostenibilidad de los suelos agrícolas al disminuir la mineralización, así como el contenido y distribución de la materia orgánica a través del perfil del suelo.

Para revertir la acidez del suelo se utilizan enmiendas calcáreas. Esta práctica eleva el valor del pH, lo cual disminuye los niveles de Al³⁺, Mn²⁺ y Fe²⁺, aporta calcio y magnesio, aumenta la disponibilidad de fósforo. Además, favorece la mineralización de la materia orgánica (MO) y mejora el rendimiento de los cultivos (Díaz-Poveda & Khalajabadi, 2022; Loaiza Loaiza, 2022; Raij, 2011; Rosas-Patiño et al., 2017).

En Honduras, existe una diversidad de materiales encalantes, que varían según su lugar de procedencia natural y contenido nutricional, lo que a su vez afecta su poder relativo de neutralización total. A pesar de la disponibilidad de esta materia prima, su uso como enmienda es poco frecuente e incluso nulo en muchos sistemas productivos de rambután. En este ensayo se pretende utilizar estas tecnologías para analizar su potencial de corregir dicha problemática y a la vez, caracterizar su contenido nutricional. Por ello, se tiene como objetivo mejorar indicadores de la acidez del suelo (pH, Al³⁺, Al³⁺+H⁺, H⁺) mediante el uso de dosis crecientes de dos enmiendas calcáreas en el cultivo de rambután situado en el litoral caribe de Honduras.

Materiales y métodos

Caracterización del área experimental

La investigación se realizó entre marzo y noviembre de 2023 en plantaciones de rambután (*Nephelium lappaceum*) del productor Enso Díaz, aldea Las Camelias, municipio San Francisco, departamento Atlántida, Honduras. La plantación está situada a 15°39'17,7" latitud norte y a los 87°00'50,7" longitud oeste, a una altitud de 56 m s. n. m. Esta finca se encuentra a 27 km de la estación meteorológica de la Universidad Nacional Autónoma de Honduras ubicada en el municipio de La Ceiba y a 9 km de la Fundación Hondureña de Investigación Agrícola ubicada en el municipio La Másica. La zona experimental se caracteriza por una temperatura promedio entre 27 y 29,5 °C, una humedad relativa de 88 a 95 %, y una precipitación anual entre 3100 mm y 3230 mm (Figura 1). La época lluviosa se extiende desde mediados de septiembre a febrero, donde cae aproximadamente el 70 % de la precipitación (Fundación Hondureña de Investigación Agrícola, 2022).

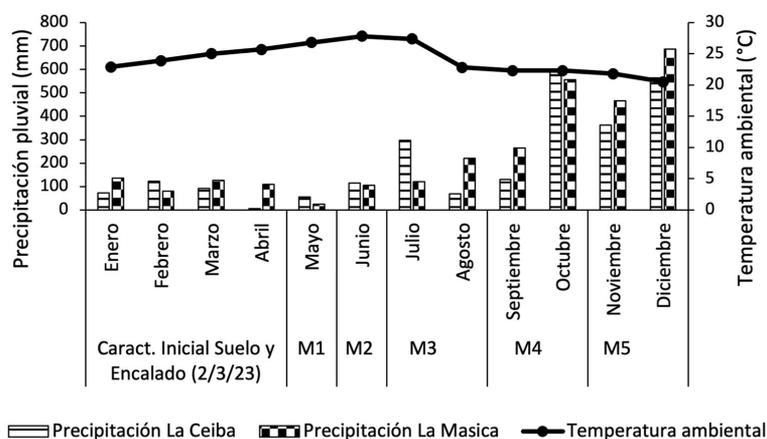


Figura 1. Precipitación pluvial y temperatura ambiental anual de los municipios de La Ceiba y La Masica, Atlántida, durante la investigación en (desde instalación del ensayo hasta el quinto y último muestreo, M5) el año 2023.

Figure 1. Annual rainfall and ambient temperature of the municipalities of La Ceiba and La Masica, Atlántida, during the investigation in (from the installation of the test to the fifth and final sampling, M5) in 2023.

Para el análisis del suelo experimental, se recolectaron diez submuestras al azar en la ladera, a una profundidad de 20 cm, en la mitad de la copa del árbol (Cuadro 1). Las características fisicoquímicas se determinaron siguiendo las metodologías del Western Hemisphere Analytical Laboratory (WHAL) de Standard Fruit de Honduras S.A. y del laboratorio de Suelos del Centro Universitario Regional del Litoral Atlántico (CURLA). Los resultados se interpretaron según escalas internacionales (Castro, 2004; Sela, 2021).

La elevada acidez intercambiable, junto con los altos niveles de Mn y Fe, y el pH bajo, reflejan una fuerte acidez del suelo que dificulta la actividad biológica. Además, el suelo registra niveles medios de materia orgánica y N total, lo que da lugar a una mineralización deficiente y un soporte nutricional ineficiente. Esto se ve reflejado en la baja disponibilidad de nutrientes, como las bases cambiables P y los micronutrientes Cu, Zn y B.

Los indicadores físicos del suelo (Cuadro 1) mostraron que la textura franco-arcillosa es laborable. La estructura granular sugiere una infiltración moderada del agua. La coloración amarillenta rojiza, se debe por la

Cuadro 1. Caracterización fisicoquímica del suelo a una profundidad de 0-20 cm, utilizado para evaluar el efecto de enmiendas calcáreas sobre la acidez del suelo sembrado con rambután. Las Camelias, Honduras. Marzo a noviembre 2023.

Table 1. Physicochemical characterization of the soil at a depth of 0-20 cm, used to evaluate the effect of calcareous amendments on the acidity of soil planted with rambutan. Las Camelias, Honduras. March to November 2023.

Parámetro	Unidad	Valor	Nivel	Método	Referencia
pH	Global	4,55	Muy ácido	Solución acuosa 1:1	
CE	dS m ⁻¹	0,10	Bajo	Extracto saturado, conductancia	Jones (1999)
N		0,14	Medio		
MO	%	2,05	Medio	Factor Van Benmelen	Jackson (1956)
Al ³⁺ +H ⁺		2,72	Alto	Extracción con KCL	Alley y Zelazny (1987)
K		0,11	Bajo		
Ca	cmol ₍₊₎ kg ⁻¹	0,32	Bajo		
Mg		0,15	Bajo		
Na		0,06	Bajo		
P		3,17	Muy bajo		
S		34,32	Alto	Detección con ICP-OES, Mehlich-3	Jones (1999)
B		0,06	Bajo		
Fe	mg kg ⁻¹	151,92	Alto		
Mn		123,16	Alto		
Cu		1,08	Bajo		
Zn		1,02	Bajo		
Densidad aparente		2,11	Compactado	Cilindro biselado	
Densidad real	Mg m ³	2,65	Constante	Valor referencia	Jaramillo (2002)
Porosidad total	%	20,40	Baja	Fórmula matemática	
Color	Código	5YR 4/6	Rojo amarillento	Tabla Munsell	Soil Survey Staff (2022)
Textura	Clase textural	Franco arcillosa	Laborable	Pipeta	Bouyoucos (1962)
Estructura	Clase	Granular	Firme	Clasificación en campo	Soil Survey Division Staff (1993)

elevada precipitación y altos niveles de Fe²⁺ durante los periodos de sequía. La alta densidad aparente (2,11 Mg m⁻³) y la baja porosidad total (20,4 %) indican una significativa compactación del suelo, lo que afecta negativamente el crecimiento de raíces, predispone a la erosión y la baja disponibilidad de nutrientes para el cultivo (Jaramillo, 2002). Dado que muchas de estas plantaciones están en laderas y reciben intensas lluvias durante la temporada de invierno, la fertilidad del suelo se ve afectada gravemente.

Tratamientos y diseño experimental

Se evaluaron dos factores principales, dos tipos de enmiendas calcáreas: cal agrícola CaCO₃ (CA) con 34,3 % Ca y 0,3 % Mg, y calcita CaCO₃ (CAL) con 25,5 % Ca y 1,2 % Mg, cuatro dosis crecientes (niveles) de cada

Cuadro 2. Descripción de materiales encalantes (factores principales) y tratamientos (interacción) aplicados al suelo en el cultivo de rambután. Las Camelias, Honduras. Marzo a noviembre 2023.

Table 2. Description of liming materials (main factors) and treatments (interaction) applied to the soil in rambutan cultivation. Las Camelias, Honduras. March to November 2023.

Material encalante (Factores principales)		Descripción		(Interacción)
Cal Agrícola (34,3 % Ca y 0,3 % Mg) - CA	Calcita (25,5 % Ca y 1,2 % de Mg) - CAL	Mg ha ⁻¹	kg/planta	Tratamientos
0	0	CA 0 + CAL 0	0 + 0	T1
	1	CA 0 + CAL 1	0 + 2,83	T2
	2	CA 0 + CAL 2	0 + 5,65	T3
	3	CA 0 + CAL 3	0 + 8,48	T4
1	0	CA 1 + CAL 0	2,83 + 0	T5
	1	CA 1 + CAL 1	2,83 + 2,83	T6
	2	CA 1 + CAL 2	2,83 + 5,65	T7
	3	CA 1 + CAL 3	2,83 + 8,48	T8
2	0	CA 2 + CAL 0	5,65 + 0	T9
	1	CA 2 + CAL 1	5,65 + 2,83	T10
	2	CA 2 + CAL 2	5,65 + 5,65	T11
	3	CA 2 + CAL 3	5,65 + 8,48	T12
3	0	CA 3 + CAL 0	8,48 + 0	T13
	1	CA 3 + CAL 1	8,48 + 2,83	T14
	2	CA 3 + CAL 2	8,48 + 5,65	T15
	3	CA 3 + CAL 3	8,48 + 8,48	T16

material y sus interacciones (Cuadro 2). El diseño fue de bloques completos al azar con un arreglo factorial 4x4 y tres repeticiones, para dar lugar a 16 tratamientos (interacción de factores). Las dosis por hectárea de cada material encalante fueron de 0, 1, 2 y 3 Mg ha⁻¹ (T1, T2, T3 y T4), distribuidas en el área de la copa de cada planta (28,27 m²) para corresponder a 0, 2,83, 5,65 y 8,48 kg por planta, respectivamente. En los tratamientos T5 a T16, se mezclaron cal agrícola y calcita, donde las dosis fueron incrementando desde 1 Mg ha⁻¹ (T2) hasta llegar a un máximo de 6 Mg ha⁻¹ (T16).

Manejo agronómico de las parcelas

La plantación sembrada en un Oxisol (Soil Survey Staff, 2014) ha sido productiva por quince años, Las unidades experimentales consistieron en parcelas de campo con una dimensión de 144 m² (12 x 12 m) para cada tratamiento. Cada parcela contenía dos árboles de rambután, plantados a 6 x 6 m al tresbolillo, con una densidad de 321 plantas por hectárea y un área total del experimento de 6912 m². Cada tratamiento tenía otras plantas alrededor como área de borde, con fines comerciales, Las variedades utilizadas en el experimento fueron R-134, R-162 y R-167, distribuidas al azar en los tratamientos, sin identificación por parte del productor, ya que no existe certificación del vivero, estos materiales fueron seleccionados por su aceptación organoléptica en el mercado nacional.

Durante el ciclo fisiológico del cultivo, se observó que la cosecha concluyó entre diciembre y enero (dependiendo de la variedad), seguida de la poda al mes siguiente. La fertilización anual consistió en la aplicación

4,1 kg de fertilizante por planta, distribuido en tres etapas: 1,36 kg entre enero y febrero, compuesto por una mezcla de 50 % urea y 50 % triple 15 (15-15-15); 0,68 kg de KCl más 0,68 kg de triple 15 entre abril y mayo; y una aplicación idéntica entre los meses de julio y agosto.

Las enmiendas calcáreas se aplicaron a inicios de marzo, dos meses después de la cosecha y poda. Se usó por única vez alrededor del área efectiva de la copa (3 m de radio) del árbol. Se removió la materia orgánica con rastrillo cuando fue necesario, para que el material encalante tuviera contacto directo con el suelo.

Variables evaluadas

Las cuatro dosis de cada enmienda calcárea como variables independientes se dispusieron sobre el suelo para reaccionar durante tres meses. El primer muestreo de las variables dependientes (pH, Al^{3+} , $\text{Al}^{3+}+\text{H}^+$, H^+) se realizó en junio y se realizaron cuatro muestreos más según recursos logísticos (vehículo) y condiciones ambientales, principalmente las lluvias. Las muestras compuestas de suelo de cada tratamiento se recolectaron a una profundidad de 20 cm en la zona de goteo de los árboles seleccionados al azar en esquema Z.

Análisis de la información

Los resultados obtenidos en cada variable (pH, Al^{3+} , $\text{Al}^{3+}+\text{H}^+$, H^+) se analizaron utilizando el software SAS versión 9.4 (SAS Institute Inc., 2002). Para determinar cuáles factores o componentes del diseño presentaron diferencias se realizó el ANDEVA. Para determinar cuáles medias de factores y niveles, interacción de factores (tratamiento) y muestreo presentaron diferencias se realizaron pruebas de comparación de medias de Tukey con un nivel de significancia del 5 %. para comparar el tratamiento testigo, sin ningún tipo de cal, con los demás tratamientos, se hizo la prueba de Dunnett. Para comparar ciertos grupos de medias de tratamiento de interés se realizaron contrastes ortogonales. Para determinar la relación entre las dosis de los materiales encalantes y las distintas variables medidas se realizó un análisis de regresión.

Resultados

Dinámica del pH, aluminio, acidez activa e intercambiable del suelo con el uso y manejo de los materiales encalantes

El ANDEVA arrojó diferencias estadísticas en los factores principales, cal agrícola (CA) y calcita (CAL), para los indicadores de acidez monitoreados (Cuadro 3). También se encontró significancia para los tratamientos (interacción de factores) en las variables Al^{3+} , $\text{Al}^{3+}+\text{H}^+$ y H^+ , con excepción en el pH del suelo, donde el estímulo fue similar (Figura 2). Al momento de usar la enmienda CA la condición de acidez fue disminuyendo a través de los parámetros evaluados, encontrando que la dosis de 3 Mg ha⁻¹ fue la que generó mayor impacto. Comportamiento similar fue la que promovió la CAL con respecto a las variables analizadas, al inducir una corrección progresiva con la máxima dosis.

Cuadro 3. Indicadores de acidez del suelo en función de las dosis (0, 1, 2 y 3 Mg ha⁻¹) de cada factor principal (cal agrícola y calcita). Las Camelias, Honduras. Marzo a noviembre 2023.

Table 3. Soil acidity indicators are based on the doses (0, 1, 2 and 3 Mg ha⁻¹) of each main factor (agricultural lime and calcite). Las Camelias, Honduras. March to November 2023.

Factores principales	Dosis	Al ³⁺	H ⁺	Al ³⁺ +H ⁺	pH
	Mg ha ⁻¹		cmol ₍₊₎ kg ⁻¹		
Cal Agrícola CA	0	2,73 a	0,39 a	3,13 a	4,78 c
	1	2,08 b	0,34 ab	2,43 b	4,88 bc
	2	1,44 c	0,28 bc	1,73 c	5,11 b
	3	1,25 c	0,22 c	1,47 c	5,39 a
Calcita CAL	0	2,51 a	0,37 a	2,90 a	4,94 b
	1	1,96 ab	0,33 ab	2,30 ab	4,94 b
	2	1,62 bc	0,27 b	1,90 bc	5,06 ab
	3	1,41 c	0,25 b	1,66 c	5,19 a

abc: Promedios con igual letra no difieren significativamente según la prueba Tukey ($p < 0,05$). / abc: Averages with the same letter do not differ significantly according to the Tukey test ($p < 0.05$).

El pH del suelo tuvo un comportamiento similar significativamente ($p < 0,05$) entre los tratamientos (Figura 2). La condición más ácida se registró en el tratamiento sin enmienda (T1, 4,52), que aumentaba progresivamente con mayores dosis de encalado, independientemente del corrector de acidez utilizado. El tratamiento T16 mostró el mayor aumento en el pH (5,4).

Durante la investigación, los muestreos realizados presentaron diferencias significativas (Figura 2), según el análisis de varianza (ANDEVA). Este indicó que las fluctuaciones del pH fueron inducidas por el encalado. El pH registrado al inicio del experimento fue de 4,55; tres meses después de la aplicación de los materiales, el valor ascendió a 4,74 en el primer muestreo (M1), similar estadísticamente al M3 (4,84), a partir de aquí. Seis meses después de la aplicación (29 de septiembre de 2023), el encalado estimuló mayor reacción y alcanzó los 5,41, para luego descender a 5,01 en el último muestreo, posiblemente debido a las fuertes precipitaciones pluviales en la zona de producción.

La acidez intercambiable en los suelos mostró diferencias significativas entre los tratamientos, con el valor más alto reportado en el testigo (4,8 cmol₍₊₎ kg⁻¹). A medida que aumentaban las dosis del encalado, la acidez disminuía, la cual alcanzó valores de 1,63 cmol₍₊₎ kg⁻¹ en el tratamiento T10 y 1,40 cmol₍₊₎ kg⁻¹ en el T16, con el T15 registrando el valor más bajo (1,27 cmol₍₊₎ kg⁻¹) (Figura 3), aunque desde el uso de 2 Mg ha⁻¹ del encalado en el T3 hasta la dosis máxima en T16, no difiere estadísticamente.

La acidez intercambiable varió significativamente entre los muestreos (Figura 3). Al inicio de la investigación, el valor registrado fue de 2,72 cmol₍₊₎ kg⁻¹, el cual fue disminuyendo a través del tiempo después de la aplicación del encalado y pasó de 2,61 cmol₍₊₎ kg⁻¹ en el M1 a 2,51 cmol₍₊₎ kg⁻¹ en el M3, aunque sin diferencias estadísticas en ese momento. Sin embargo, seis meses después se notó una reducción significativa de la acidez, ya que en el muestreo 4 se reportó un valor de 1,65 cmol₍₊₎ kg⁻¹, para mantener dicha tendencia en el M5.

El aluminio cambió de forma significativa entre los tratamientos (Figura 4). Las concentraciones registradas fueron elevadas, con el T1 mostrando el mayor valor, lo cual sobrepasa los límites (2 - 3 mg kg⁻¹) permitidos para considerar este elemento un problema para el suelo y la planta. A medida que aumentaban las dosis, indistintamente del material encalante, el Al³⁺ disminuyó de 1,6 cmol₍₊₎ kg⁻¹ en el T10 a valores más bajos en el T16.

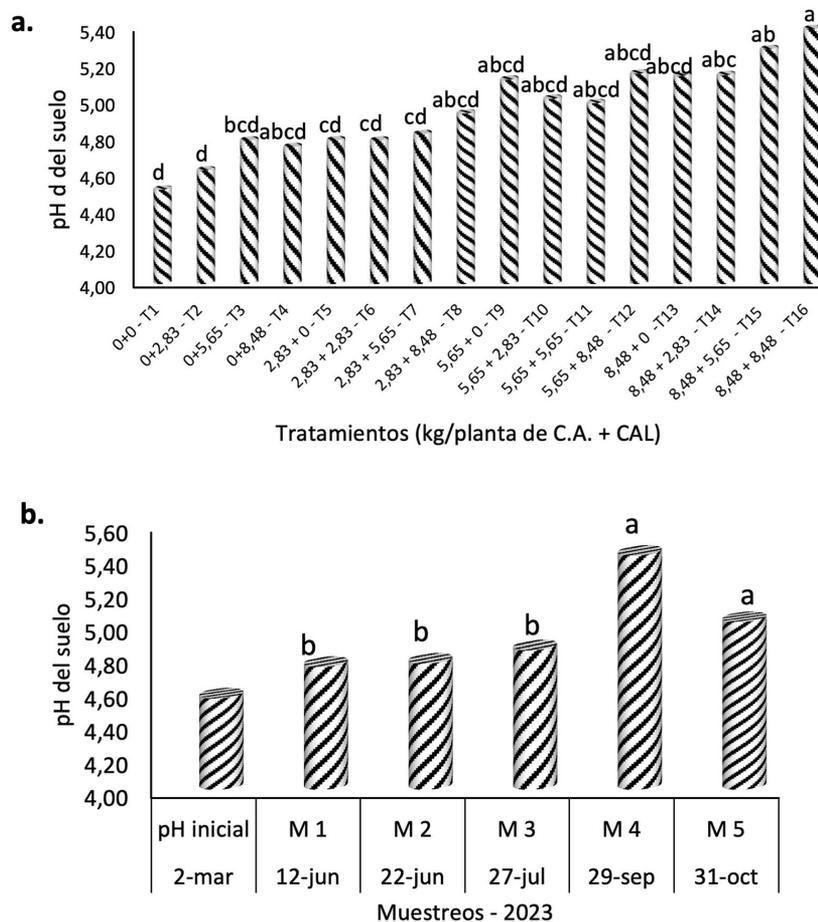


Figura 2. Variación del pH entre los tratamientos (interacción de factores) (a) y muestreos (b) durante la evaluación de los materiales encalantes en suelos ácidos del sistema de rambután. Las Camelias, Honduras. Marzo a noviembre 2023.

mar: marzo; jun: junio; jul: julio; sep: septiembre; oct: octubre.

T1: tratamiento con 0 kg/planta de cal agrícola (CA) + 0 kg/planta de calcita (CAL)...T16: tratamiento con 8,48 kg/planta de cal agrícola (CA) + 8,48 kg/planta de calcita (CAL).

Promedios con igual letra no difieren significativamente según la prueba Tukey ($p < 0,05$).

Figure 2. Variation of pH between treatments (interaction of factors) (a) and sampling (b) during the evaluation of liming materials in acidic soils of the rambutan system. Las Camelias, Honduras. March to November 2023.

mar: March; jun: June; jul: July; sep: September; oct: October.

T1: treatment with 0 kg/plant of agricultural lime (CA) + 0 kg/plant of calcite (CAL)...T16: treatment with 8.48 kg/plant of agricultural lime (CA) + 8.48 kg/plant of calcite (CAL).

Averages with the same letter do not differ significantly according to the Tukey test ($p < 0.05$).

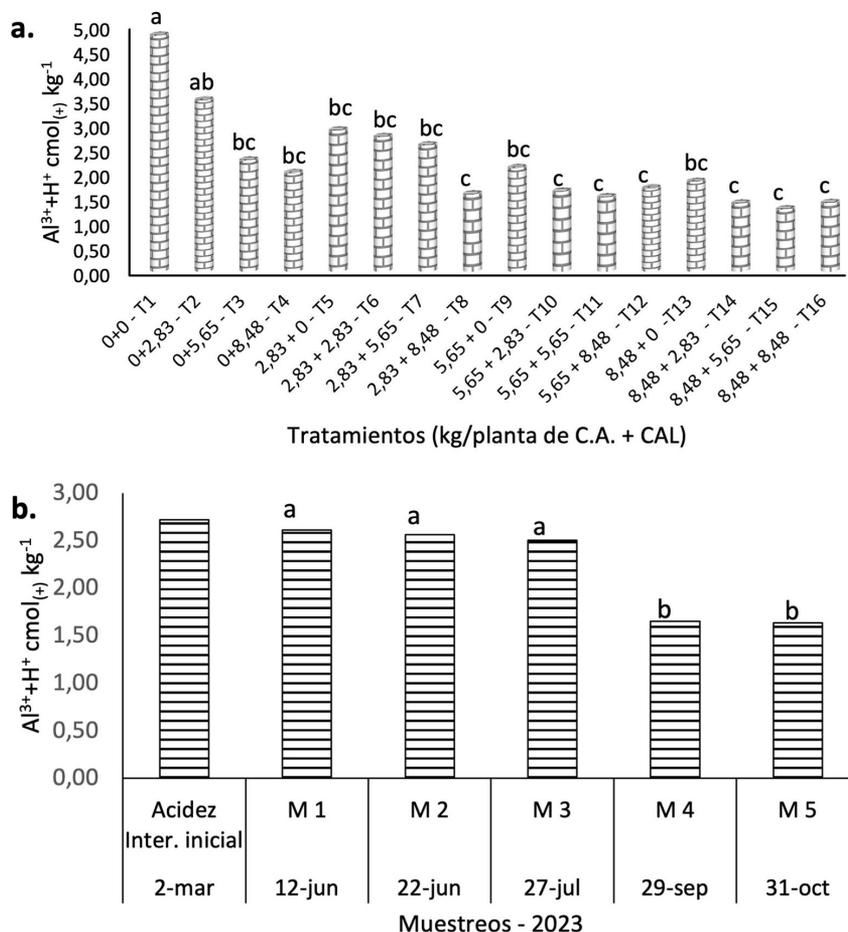


Figura 3. Dinámica de la acidez intercambiable (Al³⁺+H⁺) en los tratamientos (interacción de factores) (a) y muestreos (b) durante la evaluación de los materiales encalantes en suelos ácidos del sistema de rambután. Las Camelias, Honduras. Marzo a noviembre 2023. mar: marzo; jun: junio; jul: julio; sep: septiembre; oct: octubre.

T1: tratamiento con 0 kg/planta de cal agrícola (CA) + 0 kg/planta de calcita (CAL)...T16: tratamiento con 8,48 kg/planta de cal agrícola (CA) + 8,48 kg/planta de calcita (CAL).

Promedios con igual letra no difieren significativamente según la prueba Tukey (p<0,05).

Figure 3. Dynamics of exchangeable acidity (Al³⁺+H⁺) in treatments (interaction of factors) (a) and sampling (b) during the evaluation of liming materials in acidic soils of the rambutan system. Las Camelias, Honduras. March to November 2023.

mar: March; jun: June; jul: July; sep: September; oct: October.

T1: treatment with 0 kg/plant of agricultural lime (CA) + 0 kg/plant of calcite (CAL)...T16: treatment with 8.48 kg/plant of agricultural lime (CA) + 8.48 kg/plant of calcite (CAL).

Averages with the same letter do not differ significantly according to the Tukey test (p<0.05).

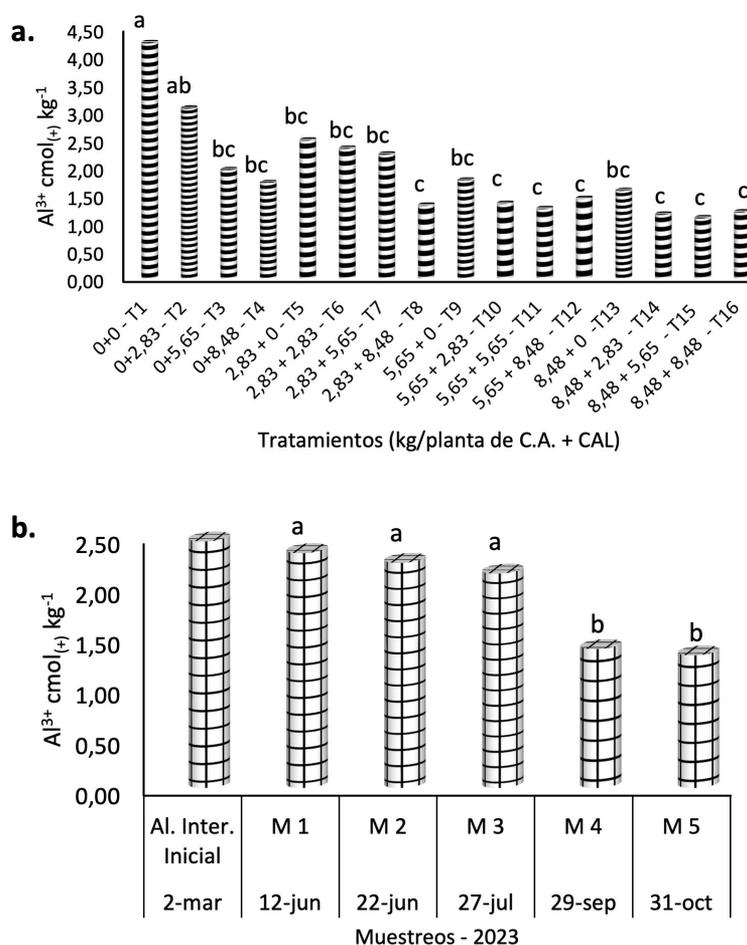


Figura 4. Dinámica del aluminio intercambiable (Al^{3+}) entre tratamientos (interacción de factores) (a) y muestreos (b) durante la evaluación de los materiales encalantes en suelos ácidos del sistema de rambután. Las Camelias, Honduras. Marzo a noviembre 2023. mar: marzo; jun: junio; jul: julio; sep: septiembre; oct: octubre.

T1: tratamiento con 0 kg/planta de cal agrícola (CA) + 0 kg/planta de calcita (CAL)...T16: tratamiento con 8,48 kg/planta de cal agrícola (CA) + 8,48 kg/planta de calcita (CAL).

Promedios con igual letra no difieren significativamente según la prueba Tukey ($p < 0,05$).

Figure 4. Dynamics of exchangeable aluminum (Al^{3+}) between treatments (interaction of factors) (a) and sampling (b) during the evaluation of liming materials in acidic soils of the rambutan system. Las Camelias, Honduras. March to November 2023.

mar: March; jun: June; jul: July; sep: September; oct: October.

T1: treatment with 0 kg/plant of agricultural lime (CA) + 0 kg/plant of calcite (CAL)...T16: treatment with 8.48 kg/plant of agricultural lime (CA) + 8.48 kg/plant of calcite (CAL).

Averages with the same letter do not differ significantly according to the Tukey test ($p < 0.05$).

El uso de enmiendas generó una reducción significativa del aluminio entre los muestreos (Figura 4). Desde el valor inicial de $2,45 \text{ cmol}_{(+) } \text{kg}^{-1}$ hasta el tercer muestreo, estos fueron similares estadísticamente (2,3, 2,2 y 2,1, respectivamente). Fue hasta el cuarto muestreo, seis meses después de la aplicación, donde se registró una disminución pronunciada (1,4), para mantener dicha tendencia hasta el final del estudio.

La acidez activa (H^+) en el suelo presentó cambios significativos entre los tratamientos (Figura 5). Los valores más elevados se encontraron en los tratamientos sin enmiendas ($0,54 \text{ cmol}_{(+)} \text{ kg}^{-1}$). Mientras, los valores más bajos y consistentes se registraron en los tratamientos T10 al T16, que fueron iguales estadísticamente, con valores menores a $0,28 \text{ cmol}_{(+)} \text{ kg}^{-1}$. La acidez activa tuvo diferencias significativas entre los muestreos (Figura 5). Desde

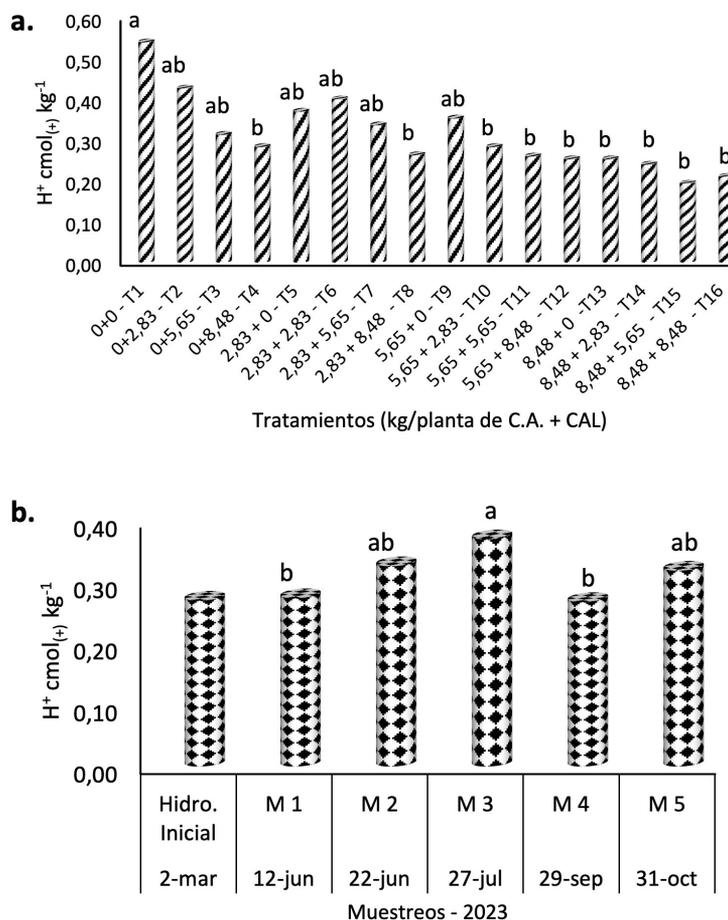


Figura 5. Cambios de la acidez activa (H^+) del suelo entre tratamientos (interacción de factores) (a) y muestreos (b) durante la evaluación de los materiales encalantes en suelos ácidos del sistema de rambután. Las Camelias, Honduras. Marzo a noviembre 2023. mar: marzo; jun: junio; jul: julio; sep: septiembre; oct: octubre.

T1: tratamiento con 0 kg/planta de cal agrícola (CA) + 0 kg/planta de calcita (CAL)....T16: tratamiento con 8,48 kg/planta de cal agrícola (CA) + 8,48 kg/planta de calcita (CAL).

Promedios con igual letra no difieren significativamente según la prueba Tukey ($p < 0,05$).

Figure 5. Changes in active acidity (H^+) of the soil between treatments (interaction of factors) (a) and sampling (b) during the evaluation of liming materials in acidic soils of the rambutan system. Las Camelias, Honduras. March to November 2023.

mar: March; jun: June; jul: July; sep: September; oct: October.

T1: treatment with 0 kg/plant of agricultural lime (CA) + 0 kg/plant of calcite (CAL)...T16: treatment with 8.48 kg/plant of agricultural lime (CA) + 8.48 kg/plant of calcite (CAL).

Averages with the same letter do not differ significantly according to the Tukey test ($p < 0,05$).

el análisis inicial ($0,27 \text{ cmol}_{(+)} \text{ kg}^{-1}$), las concentraciones aumentaron hasta el tercer muestreo ($0,37 \text{ cmol}_{(+)} \text{ kg}^{-1}$). Luego transcurrió un mes para descender a $0,27 \text{ cmol}_{(+)} \text{ kg}^{-1}$ y tener un rebote ascendente al final de $0,32 \text{ cmol}_{(+)} \text{ kg}^{-1}$, aun así, todos los muestreos, con excepción del tercero, no difirieron estadísticamente.

Reacción de la acidez del suelo con el uso de dos tipos de materiales encalantes

El efecto de los dos materiales encalantes fue significativo en la variación de los indicadores de acidez del suelo (Figura 6). A medida que aumentaban las dosis de las enmiendas, también lo hacía el pH del suelo; sin embargo, la magnitud de la neutralización difirió entre ambas enmiendas. La cal agrícola (CA) estimuló un mayor aumento

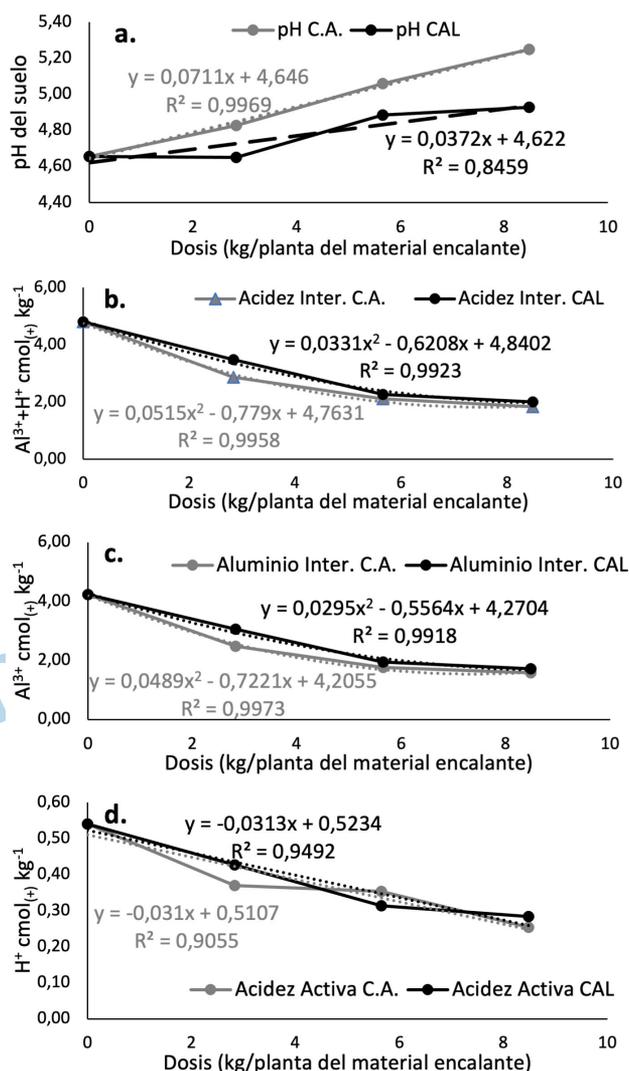


Figura 6. Efecto de los dos tipos de material encalante y diferentes dosis sobre pH (a), acidez intercambiable ($\text{Al}^{3+} + \text{H}^+$) (b), Aluminio intercambiable (Al^{3+}) (c), acidez activa (H^+) (d). Las Camelias, Honduras. Marzo a noviembre 2023.

Figure 6. Effect of the two types of liming material and different doses on pH (a), exchangeable acidity ($\text{Al}^{3+} + \text{H}^+$) (b), exchangeable aluminum (Al^{3+}) (c), active acidity (H^+) (d). Las Camelias, Honduras. March to November 2023.

del pH, que alcanzó valores de 5 con 5,65 kg/planta, y el valor más alto de pH para esta enmienda se registró con dosis de 8,48 kg/planta. Mientras que el otro material (CAL), tuvo una menor incidencia en la neutralización, ya que a la mayor dosis (8,48 kg/planta) el pH registrado fue de solo 4,92.

La acidez intercambiable del suelo disminuyó a medida que se incrementaban las dosis de los materiales encalantes. Se registraron valores de 4,79 $\text{cmol}_{(+)} \text{kg}^{-1}$ cuando no se aplicó encalado, y disminuyeron a 1,8 - 2 $\text{cmol}_{(+)} \text{kg}^{-1}$ con las dosis más altas de enmiendas. Esto evidencia que el uso de correctivos de acidez es una tecnología útil y efectiva, aunque la capacidad de neutralizar la acidez varía entre ambos materiales, en este caso CA estimuló una mejor respuesta, aunque leve, en comparación a la CAL.

La neutralización del aluminio intercambiable y la acidez activa fue efectiva con el encalado utilizado; a medida que aumentaban las dosis, estos parámetros disminuyeron en sus concentraciones, con una mejor respuesta para Al^{3+} con CA. En cuanto a la acidez positiva (H^{+}), las enmiendas mostraron un efecto fluctuante. Con la aplicación 8,48 kg de encalado, los valores de aluminio se redujeron a rangos de 1,5 - 1,7 $\text{cmol}_{(+)} \text{kg}^{-1}$.

Al comparar las plantas tratadas con los materiales encalantes versus el testigo (T1), sin aplicación alguna, se observó que la práctica agrícola impactó significativamente los indicadores de acidez (Cuadro 3). En cuanto al pH en el suelo, se registró un cambio significativo después de la aplicación de 8,48 kg de CA (T13). Por otro lado, la acidez activa, la acidez intercambiable y el aluminio fueron más sensibles, con fluctuaciones detectados desde el T2 en adelante.

Cuadro 3. Comparación por contrastes ortogonales en los tratamientos aplicados al cultivo de rambután. Las Camelias, Honduras. Marzo a noviembre 2023.

Table 3. Comparison by orthogonal contrasts in the treatments applied to the rambutan crop. Las Camelias, Honduras. March to November 2023.

	pH en el suelo	Acidez intercambiable	Aluminio	Acidez activa
	16 - 1***	2 - 1 ns	2 - 1 ns	2 - 1 ns
	15 - 1***	5 - 1***	5 - 1***	6 - 1 ns
	14 - 1***	6 - 1***	6 - 1***	5 - 1 ns
	13 - 1***	7 - 1***	7 - 1***	9 - 1 ns
	12 - 1 ns	3 - 1***	3 - 1***	7 - 1***
	8 - 1 ns	9 - 1***	9 - 1***	3 - 1***
	11 - 1 ns	4 - 1***	4 - 1***	4 - 1***
Contrastes / tratamientos	9 - 1 ns	13 - 1***	13 - 1***	10 - 1***
	10 - 1 ns	12 - 1***	12 - 1***	8 - 1***
	4 - 1 ns	10 - 1***	10 - 1***	11 - 1***
	3 - 1 ns	8 - 1***	8 - 1***	13 - 1***
	5 - 1 ns	11 - 1***	11 - 1***	12 - 1***
	7 - 1 ns	16 - 1***	16 - 1***	14 - 1***
	6 - 1 ns	14 - 1***	14 - 1***	16 - 1***
	2 - 1 ns	15 - 1***	15 - 1***	15 - 1***

ns= no significativo; ***= altamente significativo. / ns= no significant, ***= highly significant.

Discusión

El uso de enmiendas calcáreas es una práctica común para corregir la acidez del suelo. En el sistema de rambután analizado, las propiedades de acidez monitoreadas fueron mejorando con el uso por separado de ambas enmiendas con dosis de 3 Mg ha⁻¹, acentuando su efecto cuando se combinaron las calcitas a razón de 6 Mg ha⁻¹. El pH aumentó con el incremento de las dosis de enmiendas. De forma similar a los reportado por Rosas-Patiño et al. (2017) en el cultivo de cacao y Alvarado-Ochoa et al. (2024) en suelos ácidos de Ecuador. La reacción de neutralización de forma significativa en el suelo demoró 6 meses (M4) desde su aplicación. Es posible que el suelo presentara resistencia al cambio de pH debido a su alto contenido de arcilla, óxidos e hidróxidos de aluminio, hierro y manganeso, lo que le confieren un fuerte poder buffer (He et al., 2011).

Al final de la etapa de muestreo el pH descendió. La región atlántica donde se realizó la investigación se caracteriza por una alta pluviosidad, la cual registró 593,2 mm en octubre y 363,3 mm en noviembre, según datos de la estación meteorológica del UNAH-CURLA. La acidez del suelo se debe a la presencia de protones H⁺, los cuales provienen de la hidrólisis del dióxido de carbono (CO₂) por la respiración de los microorganismos, la hidrólisis de cationes metálicos y los grupos ácidos de la materia orgánica, de los grupos oxhidrilos (OH⁻) de las láminas de aluminosilicatos y de los fertilizantes (Haynes & Mokolabate, 2001; Iturri, 2015).

Las concentraciones de acidez intercambiable en el suelo disminuyeron a medida que incrementaron las dosis del encalado, sin embargo, los niveles más bajos registrados fueron entre 1,27 y 1,83 cmol₍₊₎ kg⁻¹ en los tratamientos más eficientes. No obstante, la problemática persiste, ya que en muchos suelos los niveles permitidos en sistemas agrícolas varían de 0,5 hasta 2 cmol₍₊₎ kg⁻¹ (Balsberg Pålsson, 1990). Por lo que llama la atención, para darle seguimiento al manejo del suelo por más tiempo en estas condiciones.

Es posible que la producción de hidroxilo del material encalante no fue suficiente para neutralizar el metal a niveles aceptables. Quizás aumentando la dosis, realizar dos aplicaciones al año o usar materiales con mayor poder relativo de neutralización total (PRNT), son algunas alternativas a implementar a futuro de la mano con el productor. Factores referentes a la dosis y tipos de enmiendas fueron utilizados en suelos ácidos para mejorar la fertilidad, encontrando que dosis superiores a 4 Mg ha⁻¹ y siendo el óxido de calcio el más eficiente en el control de la acidez (Terrones-Cotrina, 2024).

El aluminio intercambiable (Al³⁺) es una de las principales limitantes para la producción agropecuaria en el mundo, debido a su capacidad de generar intoxicación en las plantas y afectar la actividad microbiana y la disponibilidad de nutrientes en la solución del suelo, principalmente calcio, magnesio, fósforo y nitrógeno (Muhammad et al., 2019; Wan et al., 2020). Las concentraciones de aluminio, acidez intercambiable e hidrógeno en el suelo disminuyeron de forma significativa con el encalado a dosis de 6 Mg ha⁻¹ en el estudio de Coronado Llanos (2024).

El cultivo de rambután ha demostrado tolerar concentraciones mayores de 3 ppm, en plantaciones de diferentes edades, de 2 a 15 años, y mantener su capacidad productiva en diferentes municipios del departamento de Atlántida, Honduras (Sosa-Rodrigues & García-Vivas, 2020).

La velocidad del control de la acidez varía en los agroecosistemas, esto dependiendo del material encalante, clima y características del suelo (Yan et al., 2022). Después de la aplicación de las enmiendas, la acidez intercambiable se redujo levemente en cuatro meses, registrando diferencias significativas en el muestreo hasta el sexto mes, cuando las concentraciones disminuyeron considerablemente. Este comportamiento entre el pH y acidez intercambiable puede atribuirse al desplazamiento y/o precipitación del H⁺ y Al³⁺, que ocurre cuando el Ca²⁺ se disocia del CO₃²⁻, que produce el aumento en la concentración de iones OH⁻ en la solución del suelo (Vázquez & Millán, 2017).

La eficacia del encalado y su efecto en el tiempo cambia según múltiples experiencias. En sistemas de pasturas, la reducción de 4 a 1 cmol₍₊₎ kg⁻¹ demoró un año con una dosis de 6 Mg ha⁻¹, para luego subir a 3 cmol₍₊₎ kg⁻¹ en

el tercer año, mientras que el pH aumentó de 4,8 a 7 en el primer año, y descendió a 5,5 en el tercer año (Ramírez Pedroso et al., 2021). En el cultivo de piña en un Ultisol, la aplicación de enmiendas (CaCO_3) elevó el pH de 4,8 a 5,2 a los 60 días, pero después de 124 días, los valores disminuyeron en todos los tratamientos a menos de 4,5 (Álvarez Jiménez, 2023), lo cual refleja la capacidad buffer del suelo al cambio de pH.

El análisis por separado del aluminio intercambiable (Al^{3+}) y la acidez activa (H^+) muestra un comportamiento similar al de la acidez intercambiable. Sin embargo, destaca la tendencia creciente del H^+ en cada muestreo (Figura 4), la cual, no corresponde al resto de los indicadores de acidez. El hidrógeno proviene de diferentes fuentes, como la fertilización nitrogenada, lluvias, material parental y materia orgánica (Bolan & Hedley, 2003; Chien et al., 2008; Goulding, 2016). Aunque el aluminio pudo haberse neutralizado parcialmente con la subida del pH, no fue suficiente, ya que el pH se mantuvo cercano a 5,5, con Al^{3+} superior a $1 \text{ cmol}_{(+) } \text{kg}^{-1}$ y precipitaciones constantes, lo que dificulta la disminución del catión, lo cual se hace necesario proseguir con la práctica.

El análisis de regresión muestra una relación entre el material encalante y el pH del suelo. Las dosis crecientes de CA y CAL elevaron el pH del suelo en diferentes magnitudes; con 8,48 kg por planta (equivalente a 3 Mg ha^{-1}) de ambos materiales, el pH subió a 5,4 para CA y a 4,92 para CAL. Atribuido al PRNT de las enmiendas, la capacidad buffer que brindan los coloides y las precipitaciones pluviales, que inciden en la efectividad de esta práctica agronómica.

El material C.A. posee un 34,3 % de Ca y 0,3 % de Mg, obteniendo un PRNT de 50,17 %, mientras que CAL contiene 25,5 % de Ca y 1,2 % de Mg para un PRNT de 45,11 %. Este parámetro permite comprender la capacidad de la enmienda para controlar la acidez del suelo en un lapso de tres meses (Espinosa & Molina, 1999). En este sentido, las concentraciones de $\text{Al}^{3+}+\text{H}^+$ disminuyeron, al partir de $4,8 \text{ cmol}_{(+) } \text{kg}^{-1}$ hasta 1,8 para el encalante CA y a 2 para CAL. La dosis de 8,48 kg/planta que equivale a 3 Mg ha^{-1} fue la más efectiva para el control. Al analizar el potencial de neutralización del material encalante, Tasilla Salazar (2021) demostró que al reducir la granulometría ($\leq 0,3 \text{ mm}$) del producto aplicado a una dosis de 2 Mg ha^{-1} de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ obtuvo aumento del valor del pH, pasando de 5,69 a 6,79.

Se registró que para reducir un $\text{cmol}_{(+) }$ de $\text{Al}^{3+}+\text{H}^+$ es necesario aplicar aproximadamente 1000 kg de material encalante, y esperar de cuatro a seis meses para la neutralización, ya que los OH^- producidos por la hidrólisis del carbonato en la enmienda son contrarrestados por la producción excesiva de H^+ , causada por el material parental, aluminio y, sobre todo, la lluvia. Ya que después de la neutralización inicial, el pH comenzó a bajar en el muestreo 5. El suelo se acidifica debido a las reacciones del agua con Al^{3+} , Fe^{2+} , Mn^{2+} y NO_3^- , que liberan H^+ a la solución (Fassbender & Bornemisza, 1987). Por lo consiguiente, es vital el monitoreo constante de estos parámetros en dicha zona.

Conclusiones

Las concentraciones de acidez (H^+ , Al^{3+} y $\text{Al}^{3+}+\text{H}^+$) en el suelo disminuyeron de forma significativa a los seis meses con el uso aislado (3 Mg ha^{-1}) y combinado (6 Mg ha^{-1}) de cal agrícola y calcita en las plantas de rambután, mientras que el pH se incrementó de forma paralela a la aplicación. La cal agrícola con mayor poder relativo de neutralización total fue ligeramente más eficiente en la mejora de los indicadores. La precipitación pluvial y PRNT de la enmienda son factores que modulan la neutralización de la acidez del suelo.

Agradecimientos

Los autores de la investigación agradecen a la empresa Finos Agroindustriales por el financiamiento y la logística brindada a lo largo del proyecto. La información compartida es responsabilidad de los autores y ha sido consensuada científicamente.

Referencias

- Alley, M., & Zelazny, L. W. (1987). Soil acidity: Soil pH and lime needs. In J. R. Brown (Ed.), *Soil testing: Sampling, correlation, calibration, and interpretation* (Vol. 21, pp. 65-72). Soil Science Society of America. <https://doi.org/10.2136/sssaspecpub21.c7>
- Alvarado-Ochoa, S., Chico, J., Espinosa, J., Rivera, M., Córdova, J., & Valverde, F. (2024). El encalado y su relación con la fertilidad de suelos ácidos ecuatorianos. *Siembra*, 11(3), Artículo e5564. <https://revistadigital.uce.edu.ec/index.php/SIEMBRA/article/view/5564>
- Álvarez Jiménez, L. M. (2023). *Efecto de la Aplicación de Enmiendas Convencionales y Micronizadas en la Acidez de un Ultisol y en el Crecimiento de Piña, en Río Cuarto, Alajuela, Costa Rica* [Tesis de Maestría, Universidad de Costa Rica]. Repositorio Nacional de Costa Rica Kímuk <https://www.kerwa.ucr.ac.cr/items/f57d147e-26fc-4415-97cd-3317cb6beeb>
- Bolan, N. S., & Hedley, M. J. (2003). Role of carbon, nitrogen, and sulfur cycles in soil acidification. In Z. Rengel (Eds.), *Handbook of Soil Acidity* (1st ed., Chapter 2, pp. 29-52). CRC Press.
- Bouyoucos, G. J. (1962). Hydrometer method improved for making particle size analysis of soils. *Agronomy Journal*, 54(5), 464-465. <https://doi.org/10.2134/agronj1962.00021962005400050028x>
- Castro, H., & Centro Internacional de Agricultura Tropical. (2004). Propuesta guía de indicadores analíticos para calificar suelos estables y en proceso de degradación desde el punto de vista físico. En Centro Internacional de Agricultura Tropical (Ed.), *Memorias I Taller Nacional sobre indicadores de calidad del suelo* (pp. 37-42). Centro Internacional de Agricultura Tropical.
- Chien, S. H., Gearhart, M. M., & Collamer, D. J. (2008). The effect of different ammoniacal nitrogen sources on soil acidification. *Soil Science*, 173(8), 544-551. <https://doi.org/10.1097/SS.0b013e31817d9d17>
- Coronado Llanos, N. (2024). *Efecto del encalado en la acidez del suelo en el Caserío La Totora, Distrito de Calquis, San Miguel – Cajamarca* [Tesis de grado, Universidad Nacional de Cajamarca]. Repositorio Institucional de la Universidad Nacional de Cajamarca. <http://hdl.handle.net/20.500.14074/7548>
- Díaz-Poveda, V. C., & Khalajabadi, S. S. (2022). Eficiencia de enmiendas utilizadas como correctivos de la acidez del suelo en el cultivo de café en Colombia. *Revista Cenicafé*, 73(1), e73103. <https://doi.org/10.38141/10778/73103>
- Espinosa, J., & Molina, E. (1999). *Acidez y encalado de los suelos*. International Plant Nutrition Institute.
- Fassbender, H., & Bornemisza, E. (1987). *Química de suelos con énfasis en suelos de América Latina*. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura.
- Fundación Hondureña de Investigación Agrícola. (2022). *Informe Técnico Programa de cacao y Agroforestería*. https://www.google.com/url?sa=i&url=http%3A%2F%2Fwww.fhia.org.hn%2Fdescargas%2Finformes_tecnicos%2Fin_Programa_de_Cacao_y_Agroforesteria-2022.pdf&psig=AOvVaw2Cb--qzzwZzRdU-sGPhcUB&ust=1734034242992000&source=images&cd=vfe&opi=89978449&ved=0CAcQr5oMahcKEwiYr5qLw6CKAxUAAAAAHQAAAAQCw
- Goulding, K. W. T. (2016). Soil acidification and the importance of liming agricultural soils with particular reference to the United Kingdom. *Soil Use and Management*, 32(3), 390-399. <https://doi.org/10.1111/sum.12270>

- Haynes, R. J., & Mokolobate, M. S. (2001). Amelioration of Al toxicity and P deficiency in acid soils by additions of organic residues: A critical review of the phenomenon and the mechanisms involved. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 59, 47-63. <https://doi.org/10.1023/A:1009823600950>
- He, Y., Liu, Z., Zhang, J., Wang, H., Shi, J., & Xu, J. (2011). Can assessing for potential contribution of soil organic and inorganic components for butachlor sorption be improved? *Journal of Environmental Quality*, 40(6), 1705-1713. <https://doi.org/10.2134/jeq2010.0340>
- Iturri, L. A. (2015). *Evidencias de acidificación de suelos loésicos agrícolas de Argentina*. [Tesis de Doctorado, Universidad Nacional del Sur]. Repositorio Institucional Digital de la Biblioteca Central "Profesor Nicolás Matijevic" de la Universidad Nacional del Sur. <https://repositoriodigital.uns.edu.ar/handle/123456789/2338>
- Jackson, M. L. (1956). *Soil chemical analysis advanced course: a manual of methods useful for instruction and research in soil chemistry, physical chemistry of soil fertility and soil genesis*. Parallel Press.
- Jaramillo, D. (2002). *Introducción a la ciencia del suelo*. Universidad Nacional de Colombia. <https://bibliotecadigital.ciren.cl/items/64c5b05c-f25a-4377-8220-73e6693914c0>
- Jones, B. (1999). *Soil analysis handbook of reference methods*. CRC Press.
- Loaiza Loaiza, Y. P. (2022). *Recuperación de un suelo ácido a partir de la aplicación de enmiendas de cal y humus de lombriz para la productividad de maíz en Coyaima Tolima* [Tesis de grado, Universidad Distrital Francisco José de Caldas]. Repositorio Institucional de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas. <https://repository.udistrital.edu.co/items/fcc6d349-8639-4040-adae-8ace3686b2fe>
- Muhammad, N., Zvobgo, G., & Zhan, G. (2019). A review: The beneficial effects and possible mechanisms of aluminum on plant growth in acidic soil. *Journal of Integrative Agriculture*, 18(7), 1518-1528. [https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(18\)61991-4](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(18)61991-4)
- Balsberg Pålsson, A. M. (1990). Influence of aluminum on biomass, nutrients, soluble carbohydrates and phenols in beech (*Fagus sylvatica*). *Physiologia Plantarum*, 78(1), 79-84. <https://doi.org/10.1111/j.1399-3054.1990.tb08718.x>
- Ramírez Pedroso, J. F., Gonzales Cañizares, P. J., Rivera Espinosa, R., & Hernández Jiménez, A. (2021). Response of different *Urochloa* pastures to liming, cultivated in Sabana de Manacas region, Cuba. *Cuban Journal of Agricultural Science*, 55(2), 247-256. <https://cjasience.com/index.php/CJAS/article/view/1016>
- Raij, B. (2011). *Fertilidade do solo e manejo de nutrientes*. International Plant Nutrition Institute.
- Rosas-Patiño, G., Puentes-Paramo, Y. J., & Menjivar-Flores, J. C. (2017). Relación entre el pH y la disponibilidad de nutrientes para cacao en un Entisol de la Amazonia colombiana. *Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, 18(3), 529-541. https://doi.org/10.21930/rcta.vol18_num3_art:742
- Sela, G. (2021). *Fertilización y Riego: Teoría y Mejores Prácticas*. Croipaia. <https://croipaia.com/es/libro-fertilizacion-riego/>
- Soil Survey Staff. (2014). *Claves para la Taxonomía de Suelos* (12ª ed.). Departamento de Agricultura de los Estados Unidos. <https://www.nrcs.usda.gov/sites/default/files/2022-10/Spanish-Keys-to-Soil-Taxonomy.pdf>
- Soil Survey Division Staff. (1993). *Soil survey manual* (Agriculture Handbook No. 18). United States Department of Agriculture
- Soil Survey Staff. (2022). *Keys to soil taxonomy* (13th ed.). United States Department of Agriculture. <https://www.nrcs.usda.gov/sites/default/files/2022-09/Keys-to-Soil-Taxonomy.pdf>

- Sosa-Rodrigues, B. A., & García-Vivas, Y. S. (2020). Contenido y distribución de macronutrientes en rambután en el litoral atlántico de Honduras. *Agronomía Mesoamericana*, 31(3), 761-772. <http://dx.doi.org/10.15517/am.v31i3.40421>
- SAS Institute Inc. (2002). *User`s guide* (Versión 9.1.3). SAS Institute Inc.
- Tasilla Zalazar, L. (2021). *Variación de la reacción del suelo a la aplicación de cal de diferente granulometría en la Encañada – Cajamarca*. [Tesis de grado, Universidad Nacional de Cajamarca]. Repositorio Institucional de la Universidad Nacional de Cajamarca. <http://hdl.handle.net/20.500.14074/4482>
- Terrones Cotrina, Y. (2024). *Efecto de diferentes dosis y fuentes de encalado en las propiedades químicas de un suelo ácido, en el Distrito de Calquis - San Miguel – Cajamarca*. [Tesis de grado, Universidad Nacional de Cajamarca]. Repositorio Institucional de la Universidad Nacional de Cajamarca. <http://hdl.handle.net/20.500.14074/7362>
- Vázquez, M. E., & Millán, G. J. (2017). Acidez del suelo: Origen, diagnóstico, consecuencias y tratamiento. En M. E. Vázquez (Ed), *Manejo y conservación de suelos en especial énfasis en situaciones argentinas* (pp. 229-271). Asociación Argentina de la Ciencia del Suelo.
- Wan, W., Tan, J., Wang, Y., Qin, Y., He, H., Wu, H., Zuo, W., & He, D. (2020). Responses of the rhizosphere bacterial community in acidic crop soil to pH: Changes in diversity, composition, interaction, and function. *Science of the Total Environment*, 700, Article 134418. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134418>.
- Yan, L; Riaz, M., Liu, J., Yu, M., & Cuncang, J. (2022). The aluminum tolerance and detoxification mechanisms in plants; recent advances and prospects. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 52(9), 1491-1527 <https://doi.org/10.1080/10643389.2020.1859306>.

Manuscrito aceptado