



Efecto del encalado en el rendimiento forrajero y rentabilidad del maíz INIAP 543 – QPM en un suelo andisol de Ecuador

Effect of liming on forage yield and profitability of INIAP 543 – QPM corn in an Andisol soil in Ecuador

Cargua-Chávez, Jessica Elizabeth^{1*}

Aguila-Lombeida, Mirian Susana¹

Moreno-Armijos, Lisseth Katherine¹

Intriago-Loor, Kevin Eligio¹

Párraga-Vera, Ana María¹

Cedeño-García, Galo Alexander²

Avellan-Cedeño, Benny Alexander³

López-Álava, Geoconda Aracely²

Ormaza-Cedeño, Katty Paola²

¹Instituto Superior Tecnológico Tsachila. Santo Domingo de los Tsáchilas, Ecuador

²Escuela Superior Politécnica Agropecuaria de Manabí Manuel Félix López. Calceta, Ecuador

³Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias. Portoviejo, Ecuador

Recibido: 11 Ago. 2024 | Aceptado: 03 Ene. 2025 | Publicado: 20 Ene. 2025

Autor de correspondencia*: jessicacargua@tsachila.edu.ec

Cómo citar este artículo: Cargua-Chávez, J. E., Aguila-Lombeida, M. S., Moreno-Armijos, L. K., Intriago-Loor, K. E., Párraga-Vera, A. M., Cedeño-García, G. A., Avellan-Cedeño, B. A., López-Álava, G. A. & Ormaza-Cedeño, K. P. (2025). Efecto del encalado en el rendimiento forrajero y rentabilidad del maíz INIAP 543 – QPM en un suelo andisol de Ecuador. *Revista Agrotecnológica Amazónica*, 5(1), e740. <https://doi.org/10.51252/raa.v5i1.760>

RESUMEN

El maíz forrajero es indispensable para la producción de rumiantes; sin embargo, la acidez del suelo reduce significativamente su productividad. El objetivo del trabajo fue evaluar el efecto del encalado en el rendimiento forrajero y rentabilidad del maíz INIAP 543 – QPM cultivado en un suelo andisol de Santo Domingo de los Tsáchilas, Ecuador. Se evaluaron cuatro tratamientos conformados por tres dosis de dolomita (1,0; 1,5 y 2,0 t ha⁻¹) y un tratamiento control sin cal. Las variables evaluadas fueron rendimiento de materia verde, pH final del suelo y beneficio económico neto. El encalado tuvo un impacto significativo ($p < 0,05$) en el rendimiento de materia verde y el pH final del suelo. La dosis de 1,5 t ha⁻¹ de dolomita mostró los mayores incrementos en rendimiento de materia verde. Todas las dosis de encalado lograron elevar el pH por encima de 5,5, necesario para precipitar el Al³⁺. La dosis de 1,5 t ha⁻¹ de dolomita logró la mayor rentabilidad económica. En conclusión, la dosis de 1,5 t ha⁻¹ de dolomita fue agronómica y económicamente viable para potenciar la producción forrajera de maíz en suelo andisol ácido.

Palabras clave: beneficio económico; encalado de suelo; rendimiento de forraje; suelo ácido; *Zea mays*

ABSTRACT

Forage corn is essential for ruminant production; however, the acidity of the soil significantly reduces its productivity. The aim of this work was to evaluate the effect of liming on the forage yield and profitability of INIAP 543 – QPM corn grown in an andisol soil of Santo Domingo de los Tsáchilas, Ecuador. Four treatments consisting of three doses of dolomite (1.0, 1.5 and 2.0 t ha⁻¹) and a control treatment without lime were evaluated. The variables recorded were green matter yield, final soil pH and net economic profit. Liming had a significant impact ($p < 0.05$) on green mass yield and final soil pH. The dose of 1.5 t ha⁻¹ of dolomite showed the greatest increase in green matter yield. All liming doses succeeded in raising pH above 5.5, which is necessary to precipitate Al³⁺. The 1.5 t ha⁻¹ dose of dolomite resulted in the greatest net economic profit from liming. In conclusion, the 1.5 t ha⁻¹ dose of dolomite lime is agronomically and economically viable to enhance corn forage production on acid andisol soil.

Keywords: economic benefit; soil liming; forage yield; acidic soil; *Zea mays*



1. INTRODUCCIÓN

En los últimos años, la producción de maíz ha aumentado en más de 118 % en todo el mundo ya que un mayor consumo y los avances tecnológicos fomentaron la ampliación del área productiva en más del 46 % y la mejora del rendimiento cercano a dos toneladas en los últimos 25 años; es, en la actualidad, el mayor cereal en cuanto a volumen de producción (1137 millones de toneladas) y, en la década del 2030, se proyecta que se convertirá en el principal cultivo y transable de todos los rubros agrícolas (Erenstein et al., 2022).

Para Ecuador, el maíz representa un cultivo de importancia alimentaria, social y económica, dado que es fuente de energía, empleo y dinamizante de la economía agropecuaria y agroindustrial (Analuisa Aroca et al., 2020). Para el consumo en fresco y la alimentación animal como forraje, se han desarrollado cultivares de maíz blanco de alta calidad proteica (Limongi Andrade et al., 2019).

El problema principal del cultivo sigue siendo la baja productividad (5,76 t ha⁻¹), donde la variabilidad climática, acidez del suelo, alta incidencia de plagas y enfermedades, y limitada tecnología de riego y fertilización, son los principales factores reductores de la productividad (Cavache Ulloa, 2016; Blackmore et al., 2021; MAG, 2022; INEC, 2024).

Los andisoles son suelos ácidos típicos desarrollados a partir materiales volcánicos que cubren alrededor del 1 % de la superficie terrestre, distribuidos por todos los continentes, excepto la Antártida. Presentan características asociadas con los complejos Al-humus, con una fuerte acidez y un alto contenido del ión Al³⁺ intercambiable, que es tóxico para los cultivos. Sin embargo, las secuelas de las erupciones volcánicas dan lugar a los suelos más productivos del mundo y de ahí su importancia en la seguridad alimentaria global (Fiantis et al., 2019; Takahashi, 2020).

En Ecuador, un 30 % del territorio nacional corresponde a suelos andisoles ácidos. Estos se distribuyen por la región sierra centro-norte, en las zonas húmedas de las estribaciones andinas, parte de la costa y Amazonía (Calvache, 2014; Silva et al., 2021).

En zonas tropicales húmedas como Santo Domingo de Los Tsáchilas, los suelos andisoles sufren pérdidas continuas de bases como Ca²⁺, Mg²⁺ y K⁺, debido a la lixiviación provocada por fuertes precipitaciones, lo cual genera desbalance de nutrientes, dado que los sitios dejados por el Ca²⁺, Mg²⁺ y K⁺ en la zona de intercambio, son reemplazados por H⁺ y Al³⁺, que contribuyen a incrementar la acidez. Además, contienen niveles elevados de arcilla alofana, que tienen una alta capacidad de fijación del P y disminuye su disponibilidad para las plantas (Takahashi, 2020; (Mihai et al., 2023).

Para mejorar el pH del suelo, las concentraciones de cationes básicos y reducir la toxicidad causada por hidrógeno y aluminio, se recomienda ampliamente la práctica del encalado, que consiste en aplicar materiales de reacción alcalina como calcita (CaCO₃), magnesita (MgCO₃), dolomita [CaMg(CO₃)₂], cal apagada [Ca(OH)₂] y viva (CaO), con un alto poder de neutralización de la acidez y aporte de cationes que mejoran la capacidad de intercambio y por ende su fertilidad química (Li et al., 2019; Enesi et al., 2023).

Sin embargo, la cal tiene una baja solubilidad y movilidad en el perfil del suelo, cuando esta se aplica de forma superficial en sistemas de siembra directa y no es incorporada. Este hecho, ha llevado a que se recomiende la mezcla con yeso agrícola (CaSO₄·2H₂O) dada la solubilidad de este último, que es unas 170 veces mayor con respecto a la cal, lo cual aumenta la movilidad de cationes básicos (Ca²⁺, Mg²⁺ y K⁺) en capas más profundas, y al disociarse el S-SO₄²⁻ se une al Al³⁺ intercambiable, disminuyendo su actividad y efecto tóxico en las plantas (Crusciol et al., 2016; Crusciol et al., 2019).

En este contexto, investigaciones previas han demostrado la efectividad del encalado para disminuir el impacto negativo de la acidez y potenciar la producción de maíz en suelos ácidos, donde experiencias previas han descrito mejoras del rendimiento en más del 60 % y otras incluso mayores al 100 % con relación a tratamientos controles sin encalado (Crusciol et al., 2019; Agegnehu et al., 2021).

Debido a que en Ecuador gran parte de la producción ganadera se localiza en zonas tropicales húmedas, donde prevalecen andisoles ácidos, y existe una tendencia creciente de utilizar maíces forrajeros para complementar la alimentación de rumiantes, la acidez del suelo se vuelve limitante para la producción de maíz forrajero y por consiguiente de la ganadería.

Lo anterior no permite a los productores alcanzar metas de rendimientos rentables debido a la limitada información disponible sobre recomendaciones de encalado para maíz. Por lo expuesto, el objetivo de la investigación fue evaluar el efecto del encalado en el rendimiento forrajero y rentabilidad del maíz INIAP 543 – QPM en un suelo andisol de Ecuador.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Localización

La investigación se desarrolló durante las temporadas seca del 2022 (agosto a noviembre) y lluviosa de 2023 (enero a abril), en la granja Mishilí del Instituto Superior Tecnológico Tsa'chila, localizada en el km 6 ½ de la vía Santo Domingo – Quevedo, en la provincia de Santo Domingo de los Tsáchilas, Ecuador.

El sitio experimental se ubicó geográficamente en las coordenadas UTM X: -0.300611 y Y: -79.207587 (Figura 1), a una altitud de 585 metros sobre el nivel del mar. La temperatura, precipitación, heliofanía y humedad relativa promedio anual fue de 24,9 °C, 3052 mm, 780 horas año⁻¹ y 87,3 %, respectivamente.

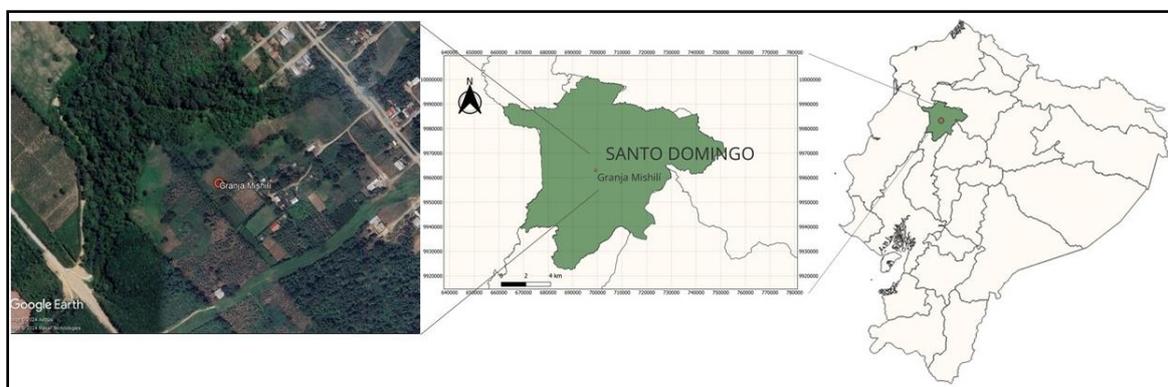


Figura 1. Localización geográfica del sitio experimental

En Santo Domingo de los Tsáchilas de acuerdo con varios estudios prevalecen los suelos de origen volcánico con presencia de arcillas amorfas como la alofana, por lo que se clasifican como Andisoles ácidos (Abril et al., 2020; Silva-Yumi et al., 2021).

Antes del experimento se tomó una muestra de suelo del sitio experimental a 0,20 m de profundidad, que fue enviada a laboratorio para determinar las características químicas, cuyos resultados se detallan en la Tabla 1.

Tabla 1. Características químicas del suelo del sitio experimental previo al establecimiento del experimento. Santo Domingo, Ecuador

pH	MO	NH ₄	P	S	K	Ca	Mg	A+H
	%	----- mg kg ⁻¹ -----			----- cmol _c kg ⁻¹ -----			
5,07	2,25	24,10	11,21	9,62	0,22	4,14	0,71	0,89

2.2. Material vegetal

Se utilizó el cultivar sintético de maíz blanco INIAP 543 – QPM de libre polinización, que fue creado por el programa de maíz de la Estación Experimental Portoviejo del Instituto Nacional de Investigaciones

Agropecuarias – INIAP. El cultivar fue desarrollado y liberado en 2019 para el consumo en fresco como choclo, para uso industrial y forraje debido a su alta calidad proteínica (Limongi Andrade et al., 2019).

2.3. Tratamientos, diseño y unidad experimental

Los tratamientos evaluados fueron tres niveles de cal dolomita $[\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2]$: T1: 1,0 t ha⁻¹, T2: 1,5 t ha⁻¹, T3: 2,0 t ha⁻¹ y T4: tratamiento control sin encalado. La cal dolomita estuvo compuesta por 46% CaO y 12% MgO, con una granulometría de malla 100. Además, debido a la baja solubilidad y movilidad de la cal dolomita en suelos bajo sistema de siembra directa, se decidió agregar a todas las dosis de cal, yeso agrícola ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) en proporción 3:1, es decir una parte de yeso por cada tres partes de cal. Esto según lo descrito por Espinosa & Molina (1999).

En función de lo anterior, las dosis de yeso fueron 333, 500 y 666 kg ha⁻¹, para la dosis de 1,0, 1,5 y 2,0 t ha⁻¹ de cal dolomita, respectivamente. El yeso agrícola utilizado fue de granulometría malla 100, y su composición fue de 18 % de S y 26 % de CaO.

Se utilizó un diseño de bloques completos al azar (DBCA) con cuatro tratamientos, tres réplicas y 20 unidades experimentales. La unidad experimental se conformó de parcelas de 24 m² con seis hileras de plantas distanciadas a 0,80 m entre sí y 0,25 m entre plantas. La aplicación del encalado se realizó 30 días antes de la siembra, la cual fue dirigida a la línea de siembra en una banda de 0,30 m de ancho.

2.4. Variables respuesta y análisis de datos

2.4.1. Componentes de crecimiento

- La altura de la planta (m) fue medida al momento de la floración masculina, con ayuda de una cinta métrica desde el nivel del suelo hasta la hoja bandera.
- El diámetro de tallo (mm) fue registrado al momento de la floración masculina, lo cual se realizó al nivel del suelo con ayuda de un calibrador.
- El área foliar (m²) se registró en el estado fenológico R1 mediante la metodología propuesta por Razquin et al. (2017), para cuyo cálculo se utilizó la ecuación [1]:

$$AF_p = AF_{MD} * \left(\frac{NH_{obs}}{NH_{msx}} \right) * \left(\frac{AF_{esp_{obs}}}{AF_{esp_{MD}}} \right) [1]$$

- Donde AF_p es el área foliar estimada de cada planta individual a partir de la medición de: i) dicha planta individual: NH_{obs} (cantidad de hojas verdes), $AF_{esp_{obs}}$ (área foliar de la hoja de la mazorca) y ii) de la población de referencia de cada tratamiento: NH_{max} (número de hojas verdes por planta máximo observado), $AF_{esp_{MD}}$ (área foliar de la hoja de la mazorca) y AF_{MD} (AF_p promedio obtenida en el muestreo destructivo).
- El peso seco de raíces (g) se registró en el estado fenológico R1, según la metodología descrita por Pérez López et al. (2013), donde las raíces de tres plantas tomadas al azar del centro de la parcela, fueron lavadas, llevadas al laboratorio y colocadas a secar en una estufa de aire forzado a 80 °C hasta alcanzar peso constante.

2.4.2. Componentes de rendimiento

El rendimiento de materia verde (t ha⁻¹) fue registrado a los 70 días después de la siembra, en el estado fenológico R3 (grano lechoso). Para el registro del dato, se procedió a marcar en el centro de cada parcela experimental un área de 2 m², de donde se extrajeron todas las plantas incluidas las mazorcas, las cuales fueron trituradas en una picadora de pasto, donde se registró el peso verde en kg, y con este dato se estimó el rendimiento por hectárea.

El rendimiento de materia seca ($t\ ha^{-1}$) también fue tomado a los 70 días después de la siembra (etapa R3), para lo cual se tomaron tres muestras de materia verde triturada de 100 g de cada parcela experimental, que fueron llevadas a laboratorio y colocadas en estufa de aire forzado a $80^{\circ}C$ hasta lograr peso seco constante. Con el dato de peso seco se estimó el rendimiento de materia seca por hectárea.

2.4.3. pH del suelo y concentración de nutrientes en tejido foliar

La concentración de macronutrientes en el tejido foliar se evaluó a los 70 días después de la siembra (etapa R3), para lo cual del centro de la parcela experimental se tomó una muestra compuesta de doce hojas al azar (submuestras) ubicadas debajo de la mazorca, siguiendo la metodología de Correndo & García (2012). Estas hojas fueron enviadas al laboratorio de suelos, aguas y tejidos de la Escuela Superior Politécnica Agropecuaria de Manabí, donde las determinaciones de los macronutrientes se las realizó por digestión seca y nitrógeno total por Método Kjeldahl.

Para el registro del pH final del suelo, de cada unidad experimental se recolectaron cinco submuestras de suelo a una profundidad de 0,20 m, tomadas dentro de la línea de siembra con la ayuda de un barreno. Las submuestras fueron mezcladas homogéneamente en un recipiente plástico limpio evitando tocar el suelo con la mano para evitar alteración de la muestra. Seguidamente se colocó un kg de la muestra homogénea en una bolsa plástico ziploc, se rotuló con marcador y fue enviada al laboratorio, donde las determinaciones de pH se realizaron en relación suelo- H_2O con volumen 1:2,5.

2.4.4. Componente económico

El análisis económico de los tratamientos se estimó mediante expresiones algebraicas aplicadas por Ayvar-Serna et al. (2020), donde el costo total (CT) se estima sumando los costos fijos (CF) más los costos variables (CV), ($CT = CF + CV$). Para cuantificar el ingreso total (IT), el ingreso obtenido por la venta de productos se calculó según la fórmula: $IT = PV \cdot Ren$, en la cual: PV es el precio de venta del forraje verde (USD/bolsa de 40 kg), y Ren es el rendimiento por hectárea (bolsas de forraje de 40 kg). El ingreso neto (IN) es el resultado de restar el ingreso total menos los gastos totales ($IN = IT - CT$). La relación beneficio-costeo o retorno por dólar invertido (RBC) se obtiene dividiendo el ingreso neto entre los gastos totales ($RBC = IN/CT$).

Los datos registrados fueron analizados a través del ANOVA y la separación de medias con prueba de Tukey ($\alpha = 0,05$). El paquete estadístico utilizado fue el InfoStat profesional versión 2020.

2.5. Manejo específico del experimento

Antes de la siembra, las semillas fueron tratadas con imidacloprid + tiodicarb en dosis de $25\ mL\ kg^{-1}$ de semillas. A los 10 días después de la siembra (DDS), se aplicó el insecticida tiametoxam en forma de "drench" a una dosis de $1\ mL\ L^{-1}$ de agua. Con base en el monitoreo de poblaciones de insectos vectores (cicadélidos, pulgones, trips y escarabajos), se aplicó fipronil en dosis de $0,7\ mL \cdot L^{-1}$ de agua a los 30 días después de la siembra.

Se realizaron dos controles de gusano cogollero, la primera a los 20 días después de la siembra con el insecticida Spinetoram con dosis de $0,5\ mL\ L^{-1}$ de agua, mientras que en la segunda se realizó a los 45 días después de la siembra con el insecticida Lufenuron en dosis de $1,5\ mL\ L^{-1}$ de agua.

El control pre-emergente de malezas se realizó con la mezcla de los herbicidas Atrazine-80 + Pendimethalin en dosis de $1,5 + 3,0\ litros\ ha^{-1}$, respectivamente de cada producto. Para el control de malezas en pos-emergencia, se aplicó MCPA a razón de $0,75\ L\ ha^{-1}$, más el herbicida nicosulfurón a razón de $50\ g\ ha^{-1}$. La aplicación pos-emergente se realizó cuando las malezas tenían entre una a tres hojas.

La fertilización se determinó en función al análisis de suelo, la demanda del cultivo y a experiencias previas de fertilización en la zona. La dosis de fertilización fue de 100 kg de nitrógeno, 46 kg de fósforo, 100 kg de

potasio y 50 kg de azufre. Se utilizó sulfato de amonio como fuente de azufre y nitrógeno, fosfato diamónico para fósforo, muriato de potasio para el potasio y nitrato de amonio como fuente de nitrógeno.

Los fertilizantes fueron aplicados en función de las etapas fenológicas, donde según estudios de García y Espinosa (2009) se da la mayor demanda nutricional y respuesta agronómica de maíces tropicales a la fertilización. En este contexto, el nitrógeno fue aplicado en tres fracciones que fueron 20 % en la etapa fenológica de emergencia (VE), el 40 % en la etapa de hoja seis (V6), y el restante 40 % en la etapa de hoja 10 (V10). El fósforo fue colocado en su totalidad al momento de la emergencia (VE). El potasio se aplicó el 50 % de la dosis en la etapa emergente (VE) y el restante 50 % en la etapa de hoja seis (V6).

En la temporada seca se realizó riego complementario por aspersión, realizándose el riego durante 10 semanas hasta completar los 70 días después de la siembra que fue donde se realizó la cosecha e hicieron las evaluaciones. Se realizaron dos riegos semanales. En la primera semana se colocó una lámina de riego de 15 mm. En la segunda y tercera semana se aplicó una lámina de riego de 21 mm. En las semanas cuarta y quinta se aplicaron 30 mm de riego. En las semanas sexta y séptima se colocó una lámina de riego de 42 mm. En las semanas ocho, nueve y 10, la lámina de riego fue de 56 mm.

3. RESULTADOS y DISCUSIÓN

3.1. Componentes de crecimiento

La altura de planta y diámetro de tallo se vieron notablemente afectados ($p < 0,05$) por los diferentes niveles de dolomita probados en las temporadas 2022 y 2023. Se observó que las dosis de 1,5 y 2,0 t ha⁻¹ fueron estadísticamente similares y tienden a promover un mayor crecimiento en comparación con el nivel más bajo de dolomita y el tratamiento control que no recibió encalado (Tabla 2).

Tabla 2. Efecto de tres niveles de dolomita en la altura y diámetro de tallo del maíz en un suelo andisol ácido

Niveles de dolomita [CaMg(CO ₃) ₂]	Época seca 2022		Época lluviosa 2023	
	Altura de planta (cm)	Diámetro de tallo (mm)	Altura de planta (cm)	Diámetro de tallo (mm)
1,0 t ha ⁻¹	2,03 b ^{1/}	24,20 b	2,08 ab	27,38 a
1,5 t ha ⁻¹	2,25 a	27,11 a	2,24 a	27,51 a
2,0 t ha ⁻¹	2,27 a	25,73 ab	2,22 a	27,03 a
Control	1,84 c	21,62 c	1,95 b	23,11 b
p-valor ANOVA	0,0047	0,0001	0,0042	0,007
C.V. %	4,83	5,97	2,94	5,82

^{1/}Medias dentro de columnas con letras distintas, difieren estadísticamente según prueba de Tukey ($\alpha = 0,05$)

Los resultados de altura de planta alcanzados fueron cercanos a los obtenidos por Devkota et al. (2019) y Chairiyah et al. (2021) quienes reportaron mayor altura de planta con relación al tratamiento control sin cal, y alturas de plantas similares entre dosis de 1,5 a 2,0 t ha⁻¹ de cal, por lo que, desde un punto de vista de optimización, 1,5 t ha⁻¹ puede ser suficiente para potenciar el crecimiento del maíz. No fue posible comparar los resultados de diámetro de tallo con otros autores, debido a la limitada información disponible de esta variable bajo el efecto del encalado.

Los tratamientos de encalado tuvieron un impacto significativo ($p < 0,05$) en el área foliar y la masa seca de las raíces durante las temporadas 2022 y 2023. Las tres dosis de dolomita aplicadas presentaron promedios estadísticamente similares entre sí, aunque significativamente diferentes al tratamiento control sin cal (Tabla 3).

Durante la temporada seca de 2022, las dosis de 1,5 t ha⁻¹ de dolomita fue la que logró el mayor incremento de área foliar y masa seca de raíces, con un 29,23 y 22,98 %, respectivamente, con relación al tratamiento control sin encalado (Tabla 3).

De forma similar ocurrió para la época lluviosa 2023, donde la dosis de 1,5 t ha⁻¹ de cal dolomita logró el mayor aumento del área foliar y masa seca de raíces, con el 20,29 y 34,18 %, respectivamente, sobre el tratamiento control sin cal (Tabla 3).

Tabla 3. Efecto de tres niveles de dolomita en el área foliar y masa seca de raíces del maíz en un suelo andisol ácido

Niveles de dolomita [CaMg(CO ₃) ₂]	Época seca 2022		Época lluviosa 2023	
	Área foliar (m ²)	Masa seca de raíces (g)	Área foliar (m ²)	Masa seca de raíces (g)
1,0 t ha ⁻¹	0,61 a ^{1/}	16,50 a	0,64 a	19,13 ab
1,5 t ha ⁻¹	0,65 a	17,19 a	0,69 a	21,36 a
2,0 t ha ⁻¹	0,62 a	16,60 a	0,67 a	20,45 a
Control	0,46 b	13,24 b	0,55 b	14,06 b
p-valor ANOVA	0,0001	0,0127	0,0039	0,0030
C.V. %	5,49	10,60	9,30	13,23

^{1/}Medias dentro de columnas con letras distintas, difieren estadísticamente según prueba de Tukey ($\alpha = 0,05$)

En la temporada lluviosa 2023, los promedios de área foliar y masa seca de raíces, tienden a aumentar con relación a la temporada seca 2022 en todos los tratamientos (Tabla 3), lo cual podría deberse a que los orificios de las raíces dejados por el primer ciclo de siembra, facilitan una mayor exploración del suelo por parte de nuevas raíces. Además, la mayor humedad producto de las precipitaciones y temperatura ambiental propia de la época, puede contribuir a un mayor crecimiento de las plantas, expresado en aumentos de masa radical y área foliar.

A pesar de que la dosis de 1,5 t ha⁻¹ de cal fue la que logró el mayor aumento numérico de área foliar y masa seca de raíces, desde el punto de vista estadístico y de optimización, la dosis de 1,0 t ha⁻¹ de cal sería suficiente para promover un buen desarrollo foliar y radical en las plantas de maíz (Tabla 3).

Lo anterior coincide con los resultados descritos por Kasno et al. (2023), quienes reportaron efectos estadísticamente similares entre dosis de cal dolomita de 1,0, 1,5 y 2,0 t ha⁻¹ para la masa seca de plantas de maíz incluida las raíces, donde concluyen que dosis de 1,0 t ha⁻¹ de cal serían apropiadas para estimular el crecimiento general de la planta en un suelo tropical ácido.

En cuanto al área foliar, los resultados logrados se aproximan a los reportados por Victoria et al. (2019) y Tabri et al. (2021), quienes consiguieron aumentos significativos del número de hojas, área foliar e índice de área foliar, en plantas de maíz tratadas con dosis de cal de 500 a 600 kg ha⁻¹, con respecto a tratamientos controles sin cal.

3.2. Componentes de rendimiento

Los tratamientos de encalado tuvieron un impacto positivo y significativo ($p < 0,05$) en el rendimiento de materia verde y seca durante las temporadas seca y lluviosa de 2022 y 2023, respectivamente (Tabla 4). En la temporada seca de 2022, los tratamientos de 1,5 y 2,0 t ha⁻¹ de dolomita lograron rendimientos de materia verde y seca estadísticamente similares, siendo la dosis de 1,5 t ha⁻¹ la que logró el máximo aumento en rendimiento de materia verde y seca, con 36,78 y 46,31 %, con respecto al tratamiento control, respectivamente (Tabla 4).

Situación similar se observó para la temporada lluviosa del 2023, para las dosis de 1,5 y 2,0 t ha⁻¹ que fueron estadísticamente similares, pero con mayor promedio numérico para la dosis de 1,5 t ha⁻¹, que logró incrementos del 36,70 y 51,92 % para rendimiento de materia verde y seca en su orden respectivo, con relación al tratamiento control sin encalado (Tabla 4).

En la temporada lluviosa de 2023, se observa un mayor rendimiento de materia verde y seca con relación a la temporada seca del 2022, en todos los tratamientos, aunque es más evidente en los tratamientos con

cal (Tabla 4). Este hecho podría deberse a las condiciones climáticas más cálidas y húmedas propias de la temporada lluviosa, que promueven mayor actividad fisiológica en la planta, lo cual se expresa en más acumulación de biomasa.

Tabla 4. Efecto de tres niveles de dolomita en el rendimiento de materia verde y seca del maíz en un suelo andisol ácido

Niveles de dolomita [CaMg(CO ₃) ₂]	Época seca 2022		Época lluviosa 2023	
	Rendimiento materia verde (t ha ⁻¹)	Rendimiento de materia seca (t ha ⁻¹)	Rendimiento materia verde (t ha ⁻¹)	Rendimiento de materia seca (t ha ⁻¹)
1,0 t ha ⁻¹	44,75 b ¹	11,37 b	47,27 b	14,64 b
1,5 t ha ⁻¹	47,74 a	13,69 a	50,06 a	16,41 a
2,0 t ha ⁻¹	47,56 a	13,52 a	49,12 ab	15,76 ab
Control	30,18 c	7,35 c	31,69 c	7,89 c
p-valor ANOVA	0,0067	0,0069	0,0001	0,0005
C.V. %	11,2	14,03	7,13	9,65

¹/Medias dentro de columnas con letras distintas, difieren estadísticamente según prueba de Tukey ($\alpha = 0,05$)

Los resultados de rendimiento alcanzados se asemejan a los descritos por Kasno et al. (2023) en suelos ácidos de Indonesia, quienes reportaron un incremento significativo del rendimiento de maíz, con dosis de encalado de 0,5, 1,0, 1,5 y 2,0 t ha⁻¹ de cal, con respecto al tratamiento control, donde el máximo rendimiento de grano (11,07 t ha⁻¹) fue logrado con 1,5 t ha⁻¹ de cal, pero el máximo rendimiento de biomasa seca se logró con 1,0 t ha⁻¹ de cal.

En este mismo contexto, Devkota et al. (2019) reportaron que 1,5 t ha⁻¹ de cal fue la dosis más apropiada para maximizar el rendimiento del maíz en suelos ácidos de Khumaltar, Nepal. Nuestros resultados también se aproximan a los conseguidos por Chairiyah et al. (2021) en suelos ácidos de Sumatra, Indonesia, quienes reportaron que la mayor producción de biomasa y rendimiento de grano de maíz se consiguieron con dosis de cal de entre 1,0 a 2,0 t ha⁻¹, por lo que, la dosis de 1,5 t ha⁻¹ conseguida en nuestros resultados se ubica en esos rangos.

A nivel local, la dosis de 1,5 t ha⁻¹ de cal dolomita también ha sido reportada como la óptima para el cultivo de piña en suelos andisoles ácidos de Santo Domingo de los Tsáchilas, Ecuador (Mite et al., 2009). Estos hallazgos confirman la veracidad de los resultados logrados con la dosis de 1,5 t ha⁻¹ de cal dolomita, para potenciar el rendimiento del maíz forrajero.

3.3. pH del suelo y concentración de nutrientes en tejido foliar

Los niveles de dolomita analizados tuvieron un impacto significativo ($p < 0,05$) en el pH final del suelo en las temporadas seca 2022 y lluviosa 2023. Todos los niveles de dolomita lograron incrementar el pH del suelo por encima de 5,5 (Figura 2), lo cual, según diversos autores, se considera ideal para precipitar el Al³⁺ en suelos tropicales ácidos. Niveles inferiores a este umbral favorecen la solubilización del Al³⁺ en la solución del suelo, lo que resulta fitotóxico y obstaculiza rápidamente el crecimiento de las raíces, afectando posteriormente la absorción de agua y nutrientes en las plantas (Agegnehu et al., 2021; Enesi et al., 2023; Rahman et al., 2024).

Con respecto al pH inicial de 5,07, los niveles de encalado de 1,0, 1,5 y 2,0 t ha⁻¹, lograron aumentar el pH final en 0,51, 0,63 y 0,67 unidades, respectivamente durante la época seca de 2022. Para la temporada lluviosa de 2023, el incremento del pH final fue de 0,75, 0,97 y 1,03 unidades, con los niveles de 1,0, 1,5 y 2,0 t ha⁻¹ de dolomita, respectivamente, en comparación con el pH inicial de 5,07 (Figura 2).

En la temporada lluviosa 2023, ocurrió un mayor incremento de pH final del suelo en todas las dosis evaluadas, con respecto a la temporada seca de 2022. El incremento de pH fue de 0,24, 0,34 y 0,36 unidades,

para las dosis de 1,0, 1,5 y 2,0 t ha⁻¹ de dolomita, respectivamente. La dosis de 2,0 t ha⁻¹ de dolomita fue la que logró el mayor incremento de pH en ambas temporadas y entre temporadas de siembra (Figura 2).

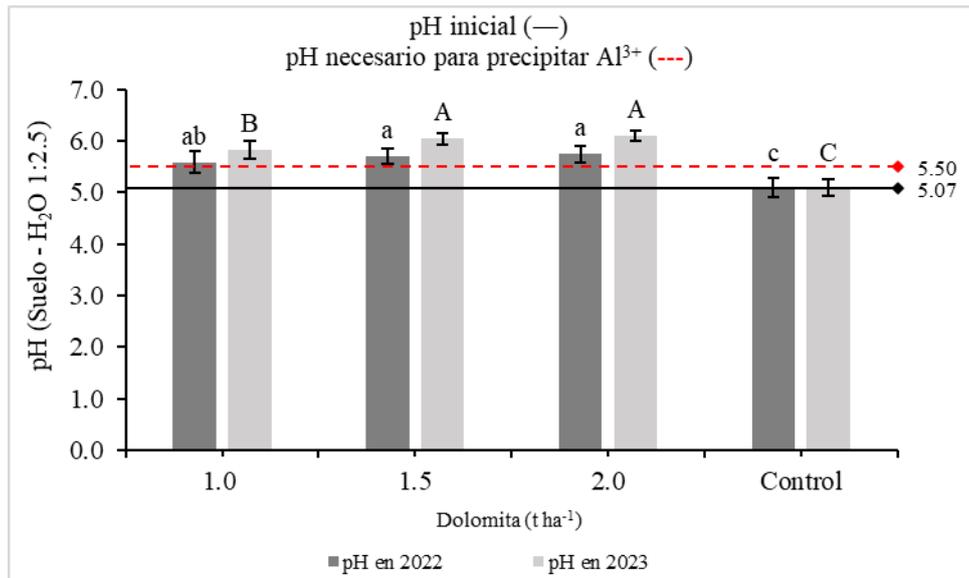


Figura 2. Efecto de tres niveles de dolomita en el pH de un suelo andisol ácido. Letras minúsculas en barras gris oscuras y mayúsculas en barras gris claro, denotan diferencias de medias significativas para el año 2022 y 2023, respectivamente, de acuerdo con prueba de Tukey ($\alpha = 0,05$)

Los resultados de pH logrados con las dosis de dolomita evaluadas, se asemejan a los reportados por Chairiyah et al. (2021), quienes lograron incrementar el pH del suelo hasta 5,80 y 6,50 con dosis de cal de 1,0 y 2,0 t ha⁻¹, respectivamente, con relación al pH inicial de 4,76. Por su parte, Agegnehu et al. (2021), indicaron que con la aplicación de 1,25 t ha⁻¹ de cal fue posible aumentar el pH desde 5,03 hasta 5,64. Los resultados alcanzados, también se acercan a los descritos por Dugalić et al. (2023), quienes reportaron aumentos del pH del suelo hasta 6,29 con la aplicación de 1,0 t ha⁻¹ de cal.

El efecto del encalado promovió una mayor concentración de macronutrientes en el tejido foliar del maíz, en las temporadas seca 2022 y lluviosa 2023 (Tabla 5). Todas las dosis de dolomita evaluadas (1,0, 1,5 y 2,0 t ha⁻¹) lograron superar el nivel crítico foliar de N (2,70 %), P (0,20 %), K (1,70 %), Ca (0,20 %), Mg (0,15 %) y S (0,10 %) establecido para maíz, según lo descrito por Correndo & García (2012), siendo la dosis de 2,0 t ha⁻¹ de dolomita, la que alcanzó los mayores valores promedios (Tabla 5).

Durante la temporada lluviosa 2023, la concentración de macronutrientes en el tejido foliar del maíz, fue aumentada con respecto a la temporada seca 2022, donde la dosis de 2,0 t ha⁻¹ se destacó con el mayor aumento (Tabla 5). Este hecho, denota que las condiciones ambientales pueden incidir en la efectividad del encalado. En contraste, el tratamiento control sin encalado, mantuvo niveles foliares de N, K, Ca, Mg y S por debajo del nivel crítico, a excepción del P que se mantuvo arriba del mencionado nivel, en ambas temporadas de siembra evaluadas (Tabla 5).

Tabla 5. Concentración de macronutrientes en tejido foliar de maíz, en función de niveles de encalado con dolomita

Niveles de dolomita [CaMg(CO ₃) ₂]	Año 2022 (%)						Año 2023 (%)					
	N	P	K	Mg	Ca	S	N	P	K	Mg	Ca	S
1,0 t ha ⁻¹	2,80	0,27	1,93	0,22	0,32	0,19	3,11	0,28	1,98	0,25	0,36	0,22
1,5 t ha ⁻¹	2,87	0,29	2,06	0,30	0,48	0,21	3,42	0,32	2,11	0,38	0,51	0,25
2,0 t ha ⁻¹	2,96	0,29	2,10	0,34	0,51	0,25	3,51	0,36	2,15	0,41	0,55	0,29
Control	2,58	0,22	1,30	0,12	0,15	0,08	2,61	0,24	1,39	0,13	0,18	0,10
Nivel crítico foliar*	2,70	0,20	1,70	0,15	0,20	0,10	2,70	0,20	1,70	0,15	0,20	0,10

*Niveles críticos foliares para maíz en hoja de la mazorca (Correndo & García, 2012)

Estos resultados son próximos a los descritos por Crusciol et al. (2019), quienes registraron un incremento en la concentración foliar de N, K, Ca, Mg y S a medida que el pH del suelo aumentó con el encalado ($2,0 \text{ t ha}^{-1}$), excepto el P no sufrió cambios por efecto del encalado.

Si bien es cierto, los resultados evidencian que la dosis de 2 t ha^{-1} de cal dolomía, fue la que logró los mejores valores numéricos para elevar el pH final del suelo y conseguir una mayor concentración de macronutrientes en el tejido foliar del maíz. Sin embargo, desde un punto de vista de ajuste y optimización, la dosis de $1,0 \text{ t ha}^{-1}$ de dolomita, podría ser suficiente para mantener el pH del suelo por encima de 5,5 y la concentración de macronutrientes en el tejido foliar, en niveles apropiados para el maíz (Figura 2 y Tabla 5).

Lo anterior destaca la importancia de establecer dosis apropiadas de encalado, para favorecer el ambiente edáfico de las raíces, promover la solubilización, disponibilidad y absorción de los nutrientes, cuyo efecto se refleja con una concentración adecuada de nutrientes en el tejido foliar, mayor crecimiento y rendimiento (Li et al., 2019; Agegnehu et al., 2021; Enesi et al., 2023).

El aumento de los componentes de crecimiento (Tablas 2 y 3), rendimiento de materia verde y seca (Tabla 4), pH final del suelo (Figura 2) y concentración de macronutrientes en el tejido foliar (Tabla 5), en la temporada lluviosa 2023, con respecto a la seca 2022, posiblemente se deba al efecto residual del encalado de la temporada 2022, que sumado al efecto del encalado 2023, potenció el efecto neutralizante de la acidez del suelo, que sumado a condiciones ambientales como mayor humedad, temperatura y brillo solar, podría haber incidido en el mayor crecimiento y productividad del maíz.

En este contexto, experiencias previas de Crusciol et al. (2019) y Daba et al. (2021) demostraron que la aplicación continua de encalado durante varios ciclos de siembra, condujo a una mejora significativa de las condiciones del suelo como aumento de pH, bases catiónicas y reducción de la toxicidad del Al^{3+} , lo cual se reflejó con la mejora sostenida del crecimiento y rendimiento de cultivos.

3.4. Componente económico

Todas las dosis de encalado probadas mejoraron la rentabilidad económica del maíz en comparación con el tratamiento control. La rentabilidad económica debido al efecto del encalado del encalado fue superior al 80 % en comparación con el tratamiento sin encalado, lo que demuestra la viabilidad económica de esta práctica en suelos ácidos (Tabla 6). Sin embargo, desde el punto de vista de la optimización económica, la dosis de $1,5 \text{ t ha}^{-1}$ de dolomita fue la que logró el mayor beneficio económico neto específico del encalado en las temporadas de siembra 2022 y 2023 (Tabla 6).

Tabla 6. Análisis económico de los tratamientos de encalado en maíz para forraje, en un suelo andisol ácido

Niveles de dolomita $[\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2]$	REN Ensilaje	PV	IT = PV*Ren	CT = CF+CV	IN = IT-CT	RBC = IN/CT	Rentabilidad (%) = $\text{RBC} \times 100$	$\text{BEN}_E = \text{IN}_T - \text{IN}_C$
Temporada seca 2022								
$1,0 \text{ t ha}^{-1}$	1119	4	4475	2401	2074	0,86	86	934
$1,5 \text{ t ha}^{-1}$	1194	4	4774	2556	2218	0,87	87	1078
$2,0 \text{ t ha}^{-1}$	1189	4	4756	2632	2124	0,81	81	984
Control	755	4	3018	1878	1140	0,61	61	-----
Temporada lluviosa 2023								
$1,0 \text{ t ha}^{-1}$	1182	4	4727	2464	2263	0,92	92	1009
$1,5 \text{ t ha}^{-1}$	1252	4	5006	2614	2392	0,92	92	1138
$2,0 \text{ t ha}^{-1}$	1228	4	4912	2671	2241	0,84	84	987
Control	792	4	3169	1915	1254	0,65	65	-----

REN = Rendimiento (bultos de 40 kg ha^{-1}); PV = Precio de venta (US\$/bulto de 40 kg); CT = Costos totales (US\$ ha^{-1}); CF = Costos fijos (US\$ ha^{-1}); CV = Costos variables (US\$ ha^{-1}); IN = Ingresos netos (US\$ ha^{-1}); RBC = Relación beneficio-costos; BEN_E = Beneficio económico neto del encalado (US\$ ha^{-1}); IN_T = Ingresos netos de los tratamientos de cal (US\$ ha^{-1}); IN_C = Ingresos netos del tratamiento control (US\$ ha^{-1}).

Los datos de rentabilidad y beneficio económico neto alcanzados son cercanos a los informados en Brasil por Crusciol et al. (2019), quienes obtuvieron un beneficio económico neto del encalado en maíz de 746 y 1257 US\$ ha⁻¹, en las temporadas 2006-2007 y 2007-2008, respectivamente. De manera similar, Kisić et al. (2021) en Bosnia y Herzegovina, lograron una ganancia neta de entre 4005 a 5018 € ha⁻¹ por efecto del encalado del suelo para producción de ensilaje de maíz. Por su parte, Krismawati et al. (2022) en Indonesia, lograron unos ingresos económicos netos de entre 16,510 hasta 19,580 rupias IDR ha⁻¹, debido al efecto del encalado de suelos ácidos para la producción de maíz.

Finalmente, el efecto beneficioso del encalado ha sido demostrado ampliamente, en la mejora de la fertilidad química de suelos ácidos, con altas concentraciones de H⁺ y Al³⁺. Cuando se encala el suelo, la cal se disocia en iones Ca²⁺, Mg²⁺ y OH⁻. El ion hidroxilo reacciona con H⁺ y Al³⁺, generando Al(OH)₃ y agua, lo que neutraliza el efecto tóxico del Al³⁺ y eleva el pH del suelo (Li et al., 2019).

También se incrementa la concentración de cationes intercambiables como Ca²⁺, Mg²⁺ y K⁺, y la saturación de bases, lo que mejora el crecimiento de raíces, facilitando la absorción de nutrientes (Agegnehu et al., 2021; Enesi et al., 2023). Además, el incremento del pH del suelo está relacionado con la presencia de cationes básicos (Ca²⁺, Mg²⁺) y aniones (CO₃²⁻) en la cal, que pueden intercambiar H⁺ en los sitios de intercambio, resultando en la formación de H₂O y CO₂. Los cationes ocupan el espacio dejado por el H⁺ en el intercambio, lo que contribuye al aumento del pH (Li et al., 2019; Enesi et al., 2023).

CONCLUSIONES

Todas las dosis de encalado fueron efectivas para aumentar el crecimiento, rendimiento y rentabilidad del maíz forrajero en la zona de estudio. La dosis de 1,0 t ha⁻¹ de cal dolomita, fue suficiente para mejorar los componentes de crecimiento del maíz. La dosis de 2,0 t ha⁻¹ de encalado, fue la que produjo mayor cambio en el pH final del suelo y condujo a un mayor incremento en la concentración de macronutrientes en el tejido foliar del maíz.

Desde un punto de vista de optimización, la dosis de 1,0 t ha⁻¹ de cal, es suficiente para elevar el pH del suelo por encima del nivel crítico (5,5) que permite precipitar al Al³⁺ y reducir su efecto tóxico. Además, esta misma dosis permite una concentración foliar de macronutrientes por encima del nivel crítico establecido para maíz.

La dosis de 1,5 t ha⁻¹ de cal dolomita, fue la más apropiada para conseguir los mayores rendimientos de materia verde y seca en maíz forrajero. Además, con esta dosis se consigue la mayor ganancia económica, por lo que sería la dosis recomendable para la zona donde se desarrolló la investigación.

FINANCIAMIENTO

Los autores no recibieron patrocinio para llevar a cabo este estudio-artículo.

CONFLICTO DE INTERESES

No existe ningún tipo de conflicto de interés relacionado con la materia del trabajo.

CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

Conceptualización: Cargua-Chávez, J. E.

Curación de datos: Moreno-Armijos, L. K.

Análisis formal: Intriago-Loor, K. E.

Adquisición de fondos: Párraga-Vera, A. M.

Investigación: Cedeño-García, G. A

Metodología: Cargua-Chávez, J. E, Aguila-Lombeida, M. S., Moreno-Armijos, L. K., Intriago-Loor, K. E, Párraga-Vera, A. M., Cedeño-García, G. A., Avellan-Cedeño, B. A, López-Álava, G. A. y Ormaza-Cedeño, K. P.
 Recursos: Avellan-Cedeño, B. A.
 Supervisión: Ormaza-Cedeño, K. P.
 Validación: Paredes-Toala, L. A.
 Visualización: Aguila-Lombeida, M. S.
 Redacción - borrador original: Cargua-Chávez, J. E, Aguila-Lombeida, M. S., Moreno-Armijos, L. K., Intriago-Loor, K. E, Párraga-Vera, A. M., Cedeño-García, G. A., Avellan-Cedeño, B. A, López-Álava, G. A. y Ormaza-Cedeño, K. P.
 Redacción - revisión y edición: Cargua-Chávez, J. E, Aguila-Lombeida, M. S., Moreno-Armijos, L. K., Intriago-Loor, K. E, Párraga-Vera, A. M., Cedeño-García, G. A., Avellan-Cedeño, B. A, López-Álava, G. A. y Ormaza-Cedeño, K. P.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abril, C., Gallardo, E., Robles Carrillo, A. M., Albán, A., & Toainga, S. (2020). Potencial geológico del Alófono en la provincia de Santo Domingo de los Tsáchilas. *FIGEMPA: Investigación y Desarrollo*, 1(1), 79-92. <https://doi.org/10.29166/revfig.v1i1.2290>
- Agegnehu, G., Amede, T., Erkossa, T., Yirga, C., Henry, C., Tyler, R., Nosworthy, M. G., Beyene, S., & Sileshi, G. W. (2021). Extent and management of acid soils for sustainable crop production system in the tropical agroecosystems: a review. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B — Soil & Plant Science*, 71(9), 852-869. <https://doi.org/10.1080/09064710.2021.1954239>
- Analuisa Aroca, I. A., Guerrero-Casado, J., Fernández Gallardo, J. A., & Rodríguez Ulcuango, O. M. (2020). Caracterización socioeconómica del agricultor maicero en la Provincia de Manabí mediante técnicas de análisis multivariantes. *Podium*, 38, 1-16. <https://doi.org/10.31095/podium.2020.38.1>
- Ayvar-Serna, S., Díaz-Nájera, J. F., Vargas-Hernández, M., Mena-Bahena, A., Tejeda-Reyes, M. A., & Cuevas-Apresa, Z. (2020). Rentabilidad de sistemas de producción de grano y forraje de híbridos de maíz, con fertilización biológica y química en trópico seco. *REVISTA TERRA LATINOAMERICANA*, 38(1), 9. <https://doi.org/10.28940/terra.v38i1.507>
- Blackmore, I., Rivera, C., Waters, W. F., Iannotti, L., & Lesorogol, C. (2021). The impact of seasonality and climate variability on livelihood security in the Ecuadorian Andes. *Climate Risk Management*, 32, 100279. <https://doi.org/10.1016/j.crm.2021.100279>
- Cavache Ulloa, M. (2016). El suelo y la productividad agrícola. *XIV Congreso Ecuatoriano de la Ciencia del Suelo EL*, 0(0), 1-28. https://www.academia.edu/9324382/LOS_SUELOS_DEL_ECUADOR.
- Chairiyah, R. R., Ramija, K. E., & Batubara, S. F. (2021). Liming of acid soil and the interaction with soil pH and corn productivity. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 807(4), 042071. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/807/4/042071>
- Correndo, A., & García, F. (2012). Concentración de nutrientes en planta como herramienta de diagnóstico: Cultivos extensivos. *Informaciones Agronómicas*, 5(February), 1-8. <http://lacs.ipni.net/article/LACS-1155>
- Crusciol, C. A. C., Artigiani, A. C. C. A., Arf, O., Carmeis Filho, A. C. A., Soratto, R. P., Nascente, A. S., & Alvarez, R. C. F. (2016). Soil fertility, plant nutrition, and grain yield of upland rice affected by surface application of lime, silicate, and phosphogypsum in a tropical no-till system. *CATENA*, 137, 87-99. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2015.09.009>
- Crusciol, C. A. C., Marques, R. R., Carmeis Filho, A. C. A., Soratto, R. P., Costa, C. H. M., Ferrari Neto, J., Castro,

- G. S. A., Pariz, C. M., Castilhos, A. M., & Franzluebbbers, A. J. (2019). Lime and gypsum combination improves crop and forage yields and estimated meat production and revenue in a variable charge tropical soil. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 115(3), 347-372. <https://doi.org/10.1007/s10705-019-10017-0>
- Daba, N. A., Li, D., Huang, J., Han, T., Zhang, L., Ali, S., Khan, M. N., Du, J., Liu, S., Legesse, T. G., Liu, L., Xu, Y., Zhang, H., & Wang, B. (2021). Long-Term Fertilization and Lime-Induced Soil pH Changes Affect Nitrogen Use Efficiency and Grain Yields in Acidic Soil under Wheat-Maize Rotation. *Agronomy*, 11(10), 2069. <https://doi.org/10.3390/agronomy11102069>
- Devkota, S., Panthi, S., & Shrestha, J. (2019). Evaluation of maize varieties in acid soil condition. *Agrica*, 8(2), 128. <https://doi.org/10.5958/2394-448X.2019.00018.X>
- Dugalić, M., Životić, L., Gajić, B., & Latković, D. (2023). Small Doses of Lime with Common Fertilizer Practices Improve Soil Characteristics and Foster the Sustainability of Maize Production. *Agronomy*, 14(1), 46. <https://doi.org/10.3390/agronomy14010046>
- Enesi, R. O., Dyck, M., Chang, S., Thilakarathna, M. S., Fan, X., Strelkov, S., & Gorim, L. Y. (2023). Liming remediates soil acidity and improves crop yield and profitability - a meta-analysis. *Frontiers in Agronomy*, 5. <https://doi.org/10.3389/fagro.2023.1194896>
- Erenstein, O., Jaleta, M., Sonder, K., Mottaleb, K., & Prasanna, B. M. (2022). Global maize production, consumption and trade: trends and R&D implications. *Food Security*, 14(5), 1295-1319. <https://doi.org/10.1007/s12571-022-01288-7>
- Espinosa, J., & Molina, E. (1999). *Acidez y Encalado de Suelos, Libro Por J Espinosa y E Molina* (1.ª ed.). International Plant Nutrition Institute.
- Fiantis, D., Ginting, F., Gusnidar, Nelson, M., & Minasny, B. (2019). Volcanic Ash, Insecurity for the People but Securing Fertile Soil for the Future. *Sustainability*, 11(11), 3072. <https://doi.org/10.3390/su11113072>
- INEC. (2024). *Módulo de Información Ambiental y Tecnificación Agropecuaria, ESPAC 2023* (p. 27). Instituto Nacional de Estadísticas y Censo. <https://www.ecuadorencifras.gob.ec/informacion-agroambiental/>
- Kasno, A., Nurida, N., Siregar, A. F., Samsun, A., Widowati, L. R., & Husnain. (2023). Enhancing chemical properties and maize yield through dolomite application on rock phosphate-amended oxisol. *E3S Web of Conferences*, 467, 01002. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202346701002>
- Kisić, I., Ćorić, R., Lončarić, Z., Jurković, D., Kajić, N., Ćorić, A., Jurina, D., & Delač, D. (2021). Effectiveness of different liming materials on some soil properties and yield of crops. *Journal of Central European Agriculture*, 22(2), 346-360. <https://doi.org/10.5513/JCEA01/22.2.3171>
- Krismawati, A., Latifah, E., & Sugiono. (2022). *Effectiveness of Dolomite on Growth and Yield of Maize (Zea mays l.) in Dry Land*. <https://doi.org/10.2991/absr.k.220102.002>
- Li, Y., Cui, S., Chang, S. X., & Zhang, Q. (2019). Liming effects on soil pH and crop yield depend on lime material type, application method and rate, and crop species: a global meta-analysis. *Journal of Soils and Sediments*, 19(3), 1393-1406. <https://doi.org/10.1007/s11368-018-2120-2>
- Limongi Andrade, R., Alarcón Cobeña, D., & Zambrano Zambrano, E. (2019). *Variedad INIAP 543-QPM con la calidad de proteína para el consumo en choclo en el litoral ecuatoriano* (p. 2). INIAP.
- MAG. (2022). *Boletín situacional del cultivo de maíz. Coordinación general de información nacional agropecuaria* (p. 6). Ministerio de Agricultura y Ganadería. http://sipa.agricultura.gob.ec/boletines/situacionales/2022/boletin_situacional_maiz_duro_2022.p

df

- Mihai, R. A., Melo Heras, E. J., Terán Maza, V. A., Espinoza Caiza, I. A., Pinto Valdiviezo, E. A., & Catana, R. D. (2023). The Panoramic View of Ecuadorian Soil Nutrients (Deficit/Toxicity) from Different Climatic Regions and Their Possible Influence on the Metabolism of Important Crops. *Toxics*, 11(2), 123. <https://doi.org/10.3390/toxics11020123>
- Mite, F., Medina, L., & Espinosa, J. (2009). Efecto de la corrección del pH en el rendimiento de piña en suelos volcánicos. *Informaciones Agronómicas*, 73, 1-5. https://www.researchgate.net/publication/320981814_Efecto_de_la_correccion_del_pH_en_el_rendimiento_de_pina_en_suelos_volcanicos
- Pérez López, A. E., Martínez Bustamante, E., Vélez Vargas, L. D., & Cotes Torres, J. M. (2013). Acumulación y distribución de fitomasa en el asocio de maíz (*zea mays l.*) y fríjol (*phaseolus vulgaris l.*) / biomass accumulation and distribution in associated crop of maize (*zea mays l.*) and bean (*phaseolus vulgaris l.*). *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*, 66(1), 16. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/72967>
- Rahman, S. U., Han, J.-C., Ahmad, M., Ashraf, M. N., Khaliq, M. A., Yousaf, M., Wang, Y., Yasin, G., Nawaz, M. F., Khan, K. A., & Du, Z. (2024). Aluminum phytotoxicity in acidic environments: A comprehensive review of plant tolerance and adaptation strategies. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 269, 115791. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2023.115791>
- Razquin, C. J., Maddonni, G. A., & Vega, C. R. C. (2017). Estimación no destructiva del área foliar en plantas individuales de maíz (*Zea mays L.*) creciendo en canopeos. *AgriScientia*, 34(1), 27. <https://doi.org/10.31047/1668.298x.v34.n1.17356>
- Silva-Yumi, J., Cazorla Martínez, R., Medina Serrano, C., & Chango Lescano, G. (2021). Alofán, una nanopartícula natural presente en andisoles del Ecuador, propiedades y aplicaciones. *La Granja*, 33(1), 53-66. <https://doi.org/10.17163/lgr.n33.2021.05>
- Tabri, F., Syafruddin, Aqil, M., & Herawati. (2021). The effect of sulphur and lime dosage application on grain yield of hybrid maize. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 911(1), 012036. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/911/1/012036>
- Takahashi, T. (2020). The diversity of volcanic soils: focusing on the function of aluminum–humus complexes. *Soil Science and Plant Nutrition*, 66(5), 666-672. <https://doi.org/10.1080/00380768.2020.1769453>
- Victoria, O., Ping, A., Yang, S., & Eneji, E. (2019). Liming and Nitrogen Effects on Maize Yield and Nitrogen Use Efficiency. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 50(16), 2041-2055. <https://doi.org/10.1080/00103624.2019.1648663>