



PERÚ

Ministerio
de Desarrollo Agrario
y Riego



Instituto Nacional de Innovación Agraria



BICENTENARIO
PERÚ
2024

Manual de encalado de suelos ácidos





MINISTERIO DE DESARROLLO AGRARIO Y RIEGO
INSTITUTO NACIONAL DE INNOVACIÓN AGRARIA
DIRECCIÓN DE SUPERVISIÓN Y MONITOREO EN LAS
ESTACIONES EXPERIMENTALES AGRARIAS

Manual de **encalado de suelos ácidos**



MANUAL DE ENCALADO DE SUELOS ÁCIDOS

MINISTERIO DE DESARROLLO AGRARIO Y RIEGO

Ministro de Desarrollo Agrario y Riego

Angel Manuel Manero Campos

Viceministro de Políticas y Supervisión del Desarrollo Agrario

Christian Alejandro Garay Torres

Viceministro de Desarrollo de Agricultura Familiar e Infraestructura Agraria y Riego

Christian Alfredo Barrantes Bravo

Jefe del INIA

Jorge Juan Ganoza Roncal, M. Sc.

© Instituto Nacional de Innovación Agraria (INIA)

Primera edición digital:

Abril, 2024

Publicado:

Abril, 2024

Disponible en:

<https://repositorio.inia.gob.pe/>

ISBN:

978-9972-44-155-4

Editado por:

Instituto Nacional de Innovación Agraria (INIA)

Equipo Técnico de Edición y Publicaciones

Av. La Molina 1981, Lima-Perú

Teléf. (511) 2402100 - 2402350

www.gob.pe/inia

Todos los derechos reservados.

Prohibida la reproducción de este libro por cualquier medio, total o parcialmente, sin permiso expreso

Hecho el Depósito Legal en la Biblioteca Nacional del Perú N° 2024-04062

Autores: Yuri Arévalo-Aranda, Wendy E. Pérez-Porras, Tomás Samaniego-Vivanco, Richard A. Solórzano-Acosta / **Colaboradores:** Ceila P. Lao-Olivares, Jimmy Ocaña-Reyes, Italo Sandoval-Arteaga / **Editora general:** Emely E. Lazo-Torreblanca / **Revisión de contenido:** Marko G. García Gutierrez, Cinthia S. Quispe Apaza / **Diseño y diagramación:** Luis E. Calderon Paredes

Tabla de **contenido**

Presentación	7
1. Introducción	9
2. Suelos ácidos	11
2.1. Tipos de acidez en los suelos	14
2.2. Causas de la acidificación	14
2.3. Efectos de la acidez del suelo	19
3. Dosificación de enmiendas	25
3.1. Calidad del encalante	29
3.2. Índices usados para la corrección de la acidez del suelo por encalado	31
4. Aplicación de enmiendas	33
4.1. Encalado en maíz	35
4.2. Encalado en frijol	37
4.3. Encalado en piña	38
4.4. Encalado en cacao	39
4.5. Encalado en café	40
5. Conclusiones	45
6. Referencias bibliográficas	47



Presentación

El Instituto Nacional de Innovación Agraria (INIA) es un organismo técnico especializado adscrito al Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego (MIDAGRI), que desarrolla actividades de investigación, transferencia tecnológica, aprovechamiento y conservación de los recursos genéticos; además de la producción de semillas, plantones y reproductores bovinos de elevado valor genético.

El INIA, a través del Proyecto Suelos y Agua, PI CUI N° 2487112, tiene como uno de sus objetivos, la transferencia de tecnología y conocimiento para el desarrollo adecuado de la agricultura, especialmente la agricultura familiar.

La existencia de suelos ácidos en varias regiones del país es un desafío que debe ser enfrentado con propuestas técnicas de manejo agrícola adecuadas a cada situación particular, entre las cuales, se incluye la aplicación de enmiendas encalantes.

Con esa orientación, se organizó información práctica con sustento técnico y científico para elaborar el presente **“Manual de encalado de suelos ácidos”**, que está dirigido a agricultores, técnicos, investigadores y público en general, interesados en esta práctica útil para la gestión de la acidez del suelo.

M Sc. Jorge Juan Ganoza Roncal
Jefe del INIA



1. Introducción

El incremento de la población mundial plantea desafíos tecnológicos en la producción de alimentos; esta situación se agrava más debido a que aproximadamente el 50 % de los suelos arables podrían catalogarse como ácidos (Wang et al., 2021).

La acidez del suelo, producto del deterioro químico, representa uno de los factores que contribuyen a la degradación global de las tierras, lo cual restringe la capacidad de producción de los cultivos (Abate et al., 2017). Su prevalencia se ha registrado en regiones con niveles moderados a elevados de precipitación y una rápida lixiviación de cationes básicos, especialmente en suelos muy meteorizados (Butterly et al., 2022).

Los agricultores y productores de todo el mundo deben gestionar la acidez del suelo para mantener la productividad de los cultivos y preservar la sostenibilidad a largo plazo de las tierras agrícolas (Myers y De Pauw, 1995).

Una práctica común para el manejo de suelos ácidos es el encalado con compuestos abundantes en Ca^{2+} y Mg^{2+} , que favorecen la inmovilización de metales pesados y cambian la absorción de nutrientes, mejorando la fertilidad del suelo y el crecimiento de las plantas (Wang et al., 2021 citando a Fornara et al., 2011, Li et al., 2019). Entre los materiales de encalado utilizados para superar la acidez del suelo están la cal agrícola, la dolomita y las escorias siderúrgicas, así como también el biochar, un material carbonado derivado de biomasa y de naturaleza alcalina (Bolan et al., 2023).

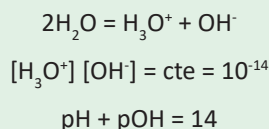
En el presente manual, con el objetivo de mitigar los efectos de la acidez del suelo, se presenta información técnica y científica sobre los tipos de acidez, las causas y los efectos de la acidificación del suelo; así como, la dosificación y aplicación de enmiendas en cultivos de interés agronómico.



2. Suelos ácidos

La acidez del suelo es el término que se usa para expresar la cantidad de iones hidrógeno (H^+) en el mismo; la cual se determina midiendo la concentración de H^+ en la solución suelo y que, como parámetro, es denominado potencial de hidrógeno o comúnmente pH.

Descriptivamente, el pH es la inversa del logaritmo en base 10 de la concentración de H_3O^+ (mol/L) en la solución suelo ($-\log [H_3O^+]$) y, de acuerdo con la ley de acción de masas, se tiene que:



En consecuencia, la concentración de H^+ y OH^- varían inversamente. Así, un pH de 7.0 en el suelo significa que en un litro de la solución suelo existen 1×10^{-7} moles de iones H^+ . Del mismo modo, para un suelo con pH de 6.0 hay 1×10^{-6} moles de iones H^+ . En este sentido, una variación en ± 1 unidades de pH indica una variación de 10 veces la cantidad de acidez o basicidad del suelo (Weil y Brady, 2017; Kicińska et al., 2022). De acuerdo con la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO, s. f.), un suelo ácido es aquel que contiene un pH de valor inferior a 5.5 durante la mayor parte del año. Este tipo de suelos están asociados con un número de toxicidades, deficiencias y otras condiciones restrictivas para el crecimiento y desarrollo de las plantas. En la Tabla 1 se resumen los tipos de suelo según el pH y los efectos en sus características agronómicas; así también, en la Tabla 2 se muestran los intervalos de pH idóneos para cultivos representativos.

pH	EVALUACIÓN	EFFECTOS ESPERABLES
< 4.5	Extremadamente ácido	Condiciones muy desfavorables
4.5-5.0	Muy fuertemente ácido	Posible toxicidad por Al^{3+} y Mn^{2+}
5.1-5.5	Fuertemente ácido	Exceso de Co, Cu, Fe, Mn y Zn Suelos sin carbonato cálcico El hormigón ordinario resulta atacado Actividad bacteriana escasa Deficiencia de Ca, K, N, Mg, Mo, P y S
5.6-6.0	Moderadamente ácido	Intervalo adecuado para la mayoría de los cultivos
6.1-6.5	Ligeramente ácido	Máxima disponibilidad de nutrientes
6.6-7.3	Neutro	Mínimos efectos tóxicos Por debajo de pH 7.0 el carbonato cálcico no es estable en el suelo
7.4-7.8	Ligeramente alcalino	Suelos generalmente con $CaCO_3$
7.9-8.4	Moderadamente alcalino	Disminuye la disponibilidad de P y B Deficiencia creciente de Co, Cu, Fe, Mn y Zn Suelos calizos Clorosis férrica debida al HCO_3
8.5-9.0	Fuertemente alcalino	En suelos con carbonatos, estos pH altos pueden deberse al $MgCO_3$, si no hay sodio intercambiable Mayores problemas de clorosis férrica
> 9.1	Muy fuertemente alcalino	Presencia de carbonato sódico Elevado porcentaje de sodio intercambiable (ESP>15 %) Toxicidad por Na y B Movilidad del P como Na_3PO_4 Actividad microbiana escasa Micronutrientes poco disponibles, excepto Mo

Tabla 1. Rangos de pH, clasificación y efectos característicos (adaptado de Porta-Casanellas et al., 2003)

CULTIVO	pH
Alfalfa	6.0 – 8.0
Algodón	4.8 – 7.5
Arándano	5.0 – 5.7
Arroz	4.0 – 8.0
Cacao	4.5 – 8.0
Café	4.5 – 7.0
Calabaza	5.5 – 6.5
Camote	5.8 – 6.0
Caña de azúcar	4.5 - 8.5
Cebada	5.5 – 8.8
Cebolla	6.0 – 6.7
Espárrago	6.0 – 7.0
Fresa	5.2 – 6.5
Lechuga	6.0 – 7.0
Maíz	5.0 – 8.0
Manzano	5.6 – 7.5
Palma aceitera	4.0 – 8.0
Papa	4.5 – 7.0
Pepinillo	5.5 – 7.5
Pimiento	5.5 – 6.5
Sorgo	5.0 – 8.5
Soya	4.5 – 7.5
Tabaco	5.5 – 8.3
Tomate	6.0 – 8.2
Trigo	5.8 – 8.5
Zanahoria	5.6 – 7.0

Tabla 2. Intervalos de tolerancia de pH de algunos cultivos (adaptado de Porta-Casanellas et al., 2003)

2.1. TIPOS DE ACIDEZ EN LOS SUELOS

a. Acidez total

Es la suma de la acidez residual e intercambiable. La acidez total se determina calculando la diferencia entre la capacidad de intercambio catiónico (CIC) y las bases de intercambio reemplazadas por amonio a pH 7 (Bloom et al., 2005).

b. Acidez residual o potencial

Es la acidez del suelo que se neutraliza con cal o una solución salina tamponada para elevar el pH a un valor específico, pero que no se puede reemplazar por una solución salina no tamponada de KCl o NaCl (Bloom et al., 2005).

c. Acidez intercambiable

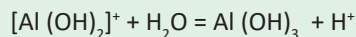
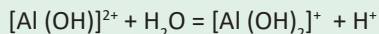
Se refiere a la acidez causada por los iones Al^{3+} y H^+ que pueden ser reemplazados en suelos ácidos por una solución de sales no tamponada, por ejemplo, de KCl o NaCl (Bloom et al., 2005).

2.2. CAUSAS DE LA ACIDIFICACIÓN

La acidificación de los suelos se puede dar por causas naturales o antrópicas, entre las más comunes se encuentran:

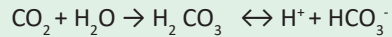
a. Por desplazamiento de aluminio intercambiable

Los iones Al^{3+} presentes en las arcillas son reemplazados por otros cationes, los cuales se unen a moléculas de agua, formando complejos hidroaluminicos. Este proceso libera iones H^+ que incrementan la acidez del suelo; estas reacciones se describen mediante las siguientes ecuaciones (Bernier y Alfaro, 2006).



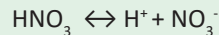
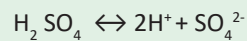
b. Por precipitación ácida

Los suelos expuestos a lluvias “puras” se tienden a acidificar hasta alcanzar un equilibrio con el pH del agua de lluvia. Esta agua de lluvia tiene un pH entre 5 y 5.6 por la disolución del CO_2 y la posterior disociación del ácido carbónico formado (Goulding, 2016).



c. Por lluvia ácida

Esta acidez es causada por deposición atmosférica de gases o partículas acidificantes, cuando el dióxido de azufre, amoníaco, ácido nítrico, ácido clorhídrico y entre otras sustancias químicas; reaccionan en la atmósfera formando lluvia ácida (H_2SO_4 y HNO_3), que posteriormente precipita al entrar en contacto con la humedad del suelo y se disocia liberando iones H^+ (Goulding, 2016).

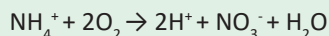


d. Por aplicación de fertilizantes y crecimiento de leguminosas

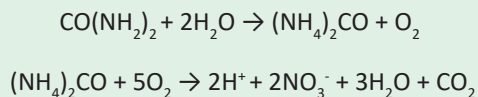
La aplicación de urea, fertilizantes con azufre elemental, a base de amonio y la siembra de leguminosas son la principal causa de acidificación en las tierras de cultivo (Bolan y Hedley, 2003).

Los fertilizantes que contienen sales de amonio y la urea producen acidificación mediante la nitrificación (Goulding, 2016). La nitrificación consiste en la oxidación del amonio y está relacionada con la generación de acidez secundaria resultante de la oxidación de fertilizantes como la urea, el sulfato de amonio y el fosfato diamónico, y la oxidación del azufre elemental liberado por los fertilizantes azufrados. Estas reacciones son representadas mediante las siguientes ecuaciones (Sánchez, 2019):

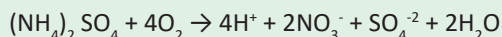
Oxidación del amonio:



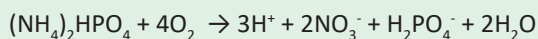
Oxidación de la urea:



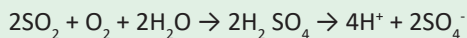
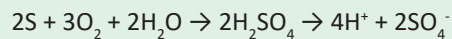
Oxidación del sulfato de amonio:



Oxidación del fosfato diamónico:



Oxidación del azufre elemental:



En el caso de las leguminosas, se da el proceso de fijación biológica de nitrógeno con la formación de NH_4^+ en los nódulos de las raíces. La absorción de cationes necesarios para este proceso requiere de la liberación de iones H^+ para balancear las cargas (Bolan y Hedley, 2003).

e. Acidificación por toma de nutrientes y exudados radiculares

La toma de nutrientes por las plantas no cultivadas o malezas causa la acidificación localizada alrededor de las raíces debido a la secreción de exudados (Figura 1), esta acidificación no tiene efectos significativos, sin embargo, tiene una gran importancia sobre la biodisponibilidad de los nutrientes en la rizósfera de las plantas (Goulding, 2016, citando a Marschner, 2012).



Figura 1. Cubierta de malezas en zonas agrícolas responsables de la extracción de nutrientes

f. Acidificación por la mineralización de la materia orgánica

La descomposición de la materia orgánica del suelo produce CO_2 , el cual reacciona con el agua del suelo formando ácido carbónico, que posteriormente se disocia y libera iones H^+ ; la respiración de las raíces y los microorganismos que descomponen la materia orgánica causan una gran acumulación de CO_2 en el aire del suelo; sin embargo, dado que a pH 5 la solubilidad del CO_2 es muy baja, es poco probable que la respiración cause una reducción del pH por debajo de 5 (Bolan y Hedley, 2003).

La acidez causada por la mineralización de la materia orgánica también puede ser ocasionada por la disociación de ácidos orgánicos producidos por los microorganismos que descomponen la materia orgánica, compuestos cuyos grupos carboxilo R-COOH liberan H^+ y se convierten en radicales RCOO^- (Bolan y Hedley, 2003). En los suelos cultivados, la labranza genera estos escenarios de mineralización, así como el riego, falta de cobertura vegetal y la temperatura elevada (Figura 2).



Figura 2. Suelo cultivado expuesto a mineralización de la materia orgánica

2.3. EFECTOS DE LA ACIDEZ DEL SUELO

a. Toxicidad

A un pH menor a 5 se liberan niveles tóxicos de Al y Mn en la solución suelo; la toxicidad por Al ocurre cuando los niveles del Al extractable son mayores a 2 ppm o el Al intercambiable es superior al 5 %; concentraciones entre 2 y 5 ppm son tóxicas para las raíces de plantas sensibles y concentraciones superiores a 5 ppm son tóxicas para las plantas tolerantes (Tabla 3) (Molina, 1998).

CULTIVOS	PORCENTAJE DE SATURACIÓN DE Al TOLERADO			SAT. ALUMINIO RECOMENDADO (%)
	Alto	Medio	Bajo	
Arroz	X	X	X	
Maíz		40		< 25
Frijol negro			X	< 20
Maní		40		< 25
Caupí	60			< 40
Papa		30		< 20
Yuca	75			< 60
Plátano		X		25
Coco		X		< 30
Mango		X		< 20
Cítricos				< 30
Piña	X			< 30
Cacao		X		< 30
Palma aceitera		X		< 15
Caña de azúcar		X		< 20
Café		40		< 25

Tabla 3. Saturación de Al tolerado por algunos cultivos en suelos ácidos (Molina, 1998)

Las concentraciones tóxicas de Al o Mn afectan al crecimiento de las raíces de las plantas y de la biota del suelo (Getaneh y Kidanemariam, 2021). También incrementan la posibilidad de erosión por la poca cobertura de los suelos y una mayor escorrentía, con la subsecuente contaminación de las fuentes de agua; así como también afectan el crecimiento y rendimiento de cultivos y pasturas (Getaneh y Kidanemariam, 2021, citando a Mcfarland et al., 2001). La coloración rojiza característica de suelos ácidos, como los ultisoles, se debe a la acumulación de óxido de hierro y aluminio (Figura 3).



Figura 3. Coloración rojiza típica de un suelo ácido debida a la acumulación de óxidos de hierro y aluminio

b. Disponibilidad de nutrientes

En los suelos ácidos se reduce la disponibilidad de nutrientes como N, P, K, S, Ca, Mg y Mo (Getaneh y Kidanemariam, 2021) y se incrementa la disponibilidad de elementos como Fe, Mn, Cu, Zn y Al (Getaneh y Kidanemariam, 2021, citando a Ngoune-Tandzi et al., 2018).

En el caso del cultivo de cacao, según Rosas-Patiño (2021), la acidez del suelo limita la disponibilidad, la absorción y la concentración de nutrientes y su rendimiento. El pH del suelo tiene gran influencia en la solubilidad de los minerales y la disponibilidad de nutrientes (Arévalo-Gardini et al., 2015) y sus cambios en el tiempo dependen de las propiedades del suelo, la cobertura vegetal, el depósito de materiales acidificantes y las condiciones climáticas (Arévalo-Gardini et al., 2015, citando a Dai et al., 1998, Boruvka et al., 2005, De Schrijver et al., 2006, Porebska et al., 2008). Con un manejo adecuado, los suelos ácidos pueden ser corregidos si se mejora el pH y la saturación de bases (Arévalo-Hernández et al., 2022).

Por tanto, con la finalidad de menguar los efectos nocivos de la acidez del suelo se suministran fertilizantes para reponer el N y el P del suelo; sin embargo, en suelos ácidos, la respuesta a los fertilizantes inorgánicos no es eficaz debido a las limitaciones impuestas por la acidez del suelo (Opala et al., 2018).

c. Actividad microbiana

En los suelos ácidos, la mayoría de los procesos microbianos se reducen debido al bajo crecimiento y reproducción de los microorganismos; en consecuencia, las tasas de descomposición de la materia orgánica y los nutrientes se ven reducidas; asimismo, las bacterias como los rizobios tienen dificultades para formar nódulos con las raíces de las leguminosas (Getaneh y Kidanemariam, 2021).

d. Condiciones físicas del suelo

Niveles elevados de acidez en el suelo conducen a la reducción de la estabilidad de la estructura del suelo (Stătescu et al., 2013), una condición desfavorable para la productividad agrícola si se considera que dicha estabilidad mejora la porosidad y reduce la erodabilidad del suelo (Stătescu et al., 2013, citando a Bronick y Lal, 2005, Duiker et al., 2003, Lal, 1991). Por tal razón, los suelos ácidos suelen presentar una estructura deficiente, con agregados poco desarrollados, con alta densidad aparente y compactados y con drenaje deficiente (Figura 4) .

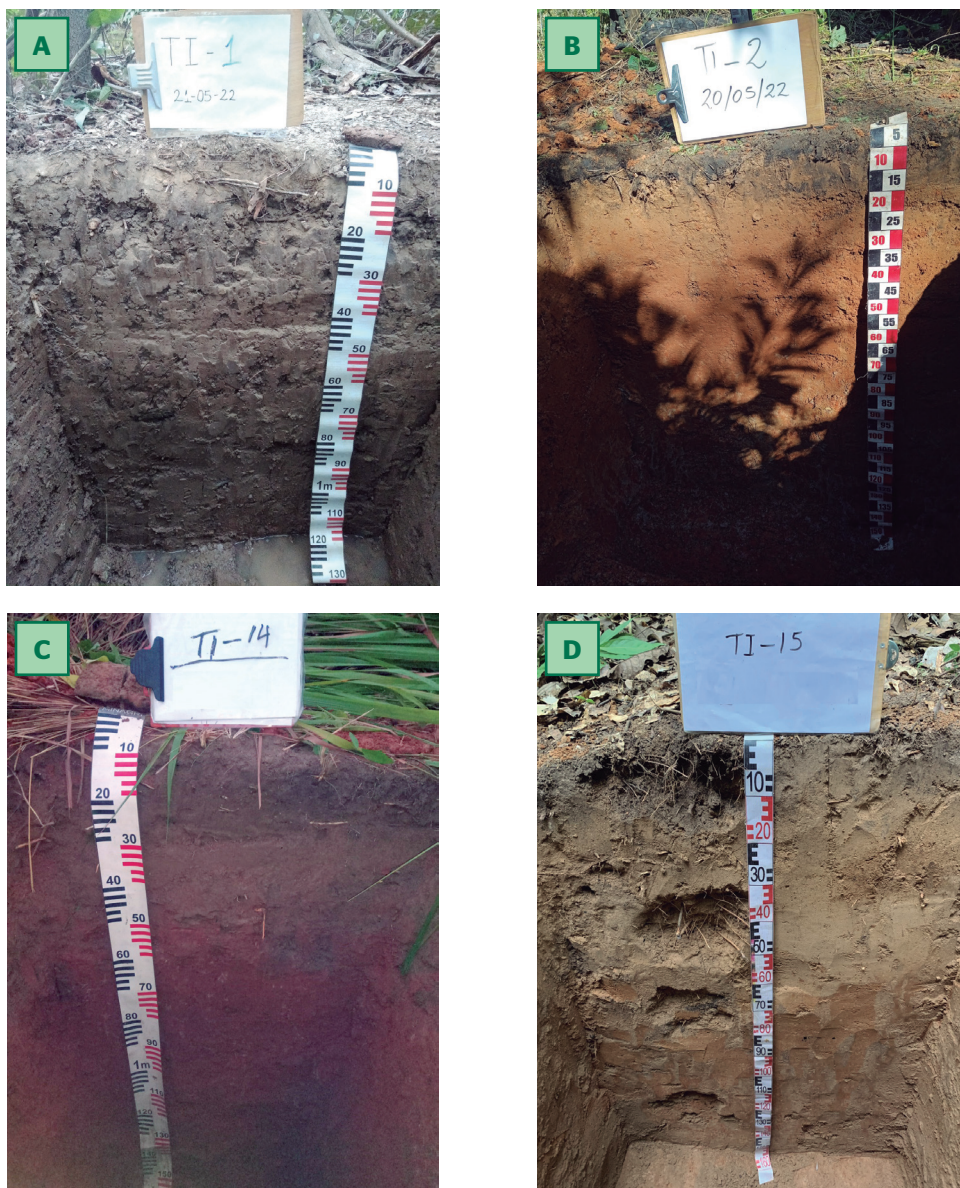


Figura 4. Calicatas en suelos ácidos del distrito de Nueva Requena, provincia Coronel Portillo, departamento de Ucayali:

- (A) suelo en terraza media con vegetación de purma y reacción muy fuertemente ácida (pH: 4.80),
- (B) suelo en lomada con vegetación de cético, kudzu, purma, plátano y reacción muy fuertemente ácida (pH: 4.09),
- (C) suelo en lomada con vegetación de pastos y reacción muy fuertemente ácida (pH: 5.02) y
- (D) suelo en lomada con vegetación de bosque secundario y reacción muy fuertemente ácida (pH: 4.62)

El encalado mejora la estructura de los suelos con textura fina, lo cual causa una reducción de la formación de costras en el suelo, mayor emergencia de semillas y menor costo energético para la labranza (Beegle y Lingenfelter, 2001).

e. Enfermedades

La acidez del suelo puede influir en ciertos patógenos de plantas, pero los patógenos varían en su tolerancia a la acidez, por lo que no es posible recomendar algún rango de pH y es necesario identificar correctamente el problema antes de utilizar alguna técnica de manejo (Beegle y Lingenfelter, 2001). Entre las enfermedades favorecidas por la acidez en el suelo están aquellas causadas por hongos de los géneros *Rhizoctonia* (Harries et al., 2020), *Phytophthora* (Loekito et al., 2022), así como *Pythium* y *Fusarium* (Alhussaen, 2012).



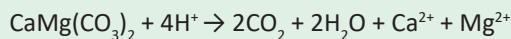


3. Dosificación de enmiendas

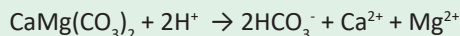
Con la finalidad de superar limitaciones causadas por la acidez del suelo y mejorar la producción de los cultivos, una práctica común es el encalado, que consiste en la aplicación de diferentes formas de minerales ricos en calcio y magnesio en suelos altamente ácidos o aquellos en los que se instalarán cultivos sensibles a la acidez (Getaneh y Kidanemariam, 2021).

Para ser efectivo, el encalante primero debe desplazar los H^+ , Al^{3+} y Mn^{2+} de los sitios de intercambio en los coloides del suelo para luego neutralizar el H^+ y precipitar Al^{3+} y Mn^{2+} en la solución del suelo (Filipek, 2011).

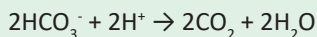
Para la corrección de pH del suelo, es frecuente el uso de dolomita, la cual puede suplementar iones Ca, Mg y mantenerlos en balance. Se ilustran las reacciones químicas que se dan tras su aplicación a un suelo ácido (Fageria y Nascente, 2014).



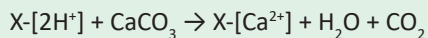
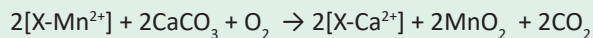
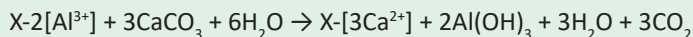
Esta reacción ocurre en dos etapas, en la primera etapa, el Ca y el Mg reaccionan con el hidrógeno para reemplazar estos iones con Ca^{+2} y Mg^{+2} en los sitios de intercambio, formando HCO_3^- :



En la segunda etapa, el HCO_3^- reacciona con los iones H^+ , formando CO_2 y agua, incrementando el pH.



Conforme la caliza se disuelve en la solución suelo, los iones Ca^{2+} y Mg^{2+} reemplazan los iones Al^{3+} en los sitios de cambio, y el anión reacciona con los iones hidrógeno, incrementando el pH. Las siguientes ecuaciones describen la reacción que ocurre debido a la adición de caliza en suelos ácidos (Fageria y Nascente, 2014).



La velocidad de reacción del encalado está determinada —principalmente— por la humedad y temperatura del suelo, la cantidad y calidad del material calcáreo (Fageria y Nascente, 2014).

Los materiales encalantes más utilizados, según Bernier y Alfaro (2006), son carbonatos, óxidos, hidróxidos y silicatos de calcio y/o magnesio (Tabla 4).

ENCALANTE	CARACTERÍSTICAS DEL ENCALANTE
Óxido de calcio CaO	<p>El CaO, conocido como cal viva o cal quemada, es un polvo blanco derivado de la calcinación de la piedra caliza. Cuando se aplica a suelos ácidos reacciona muy rápidamente, dando buenos resultados en corto tiempo. Sin embargo, debido a sus características es difícil y desagradable de manejar y tiene que ser homogeneizada con el suelo inmediatamente. El contenido de calcio de la cal viva pura es de 71 %.</p>
Hidróxido de calcio Ca(OH)₂	<p>También llamado cal hidratada o cal apagada, se obtiene por la hidratación del CaO. Sin embargo, debido a sus características es difícil y desagradable de manejar y tiene que ser homogeneizada con el suelo inmediatamente. Cuando se aplica a suelos ácidos tiene un efecto intermedio entre el óxido de calcio y el carbonato de calcio para neutralizar la acidez del suelo. El contenido de Ca del Ca(OH)₂ puro es de 56 %.</p>
Cal agrícola o calcita CaCO₃	<p>Es el encalante más usado y contiene principalmente carbonato de calcio (CaCO₃). Se obtiene a partir de roca caliza y roca calcárea que se muele y se cierne. Normalmente, el contenido de impurezas es alto y, en general, el contenido de calcio de la calcita pura es de 40 % (Figura 5).</p>
Dolomita CaMg(CO₃)₂	<p>Es conocida como carbonato doble de calcio y magnesio. A diferencia de los encalantes anteriores, la dolomita reacciona más lento en el suelo, pero tiene como ventaja el suministro de magnesio. Al igual que la calcita, la dolomita tiene un alto contenido de impurezas y, en general, el contenido de calcio y magnesio de este encalante es de 21.6 % y 13.1 %, respectivamente.</p>
Magnesita MgCO₃	<p>La magnesita es un mineral cuya composición es principalmente MgCO₃, contiene impurezas de Fe, Co, Mn, Ni y Ca. El contenido de Mg de la magnesita pura normalmente es de 28.5 %.</p>
Óxido de magnesio MgO	<p>Es una sustancia con una gran capacidad encalante debido a que, además de neutralizar las cargas ácidas de los suelos, aporta Mg. Sin embargo, debido a que es poco soluble en agua, es necesario que las partículas tengan un tamaño muy pequeño para que pueda controlar eficazmente la acidez del suelo. Esta sustancia tiene como ventaja aportar Mg en suelos ácidos. El contenido de Mg del MgO puro es del 60 %.</p>
Margas	<p>Las margas son rocas sedimentarias compuestas por calcita y arcillas, en proporciones muy variables. Las margas tienen en su composición CaCO₃ en concentraciones que varían entre 35 % y 65 %.</p>
Escorias industriales	<p>Algunas escorias derivadas de la industria metalúrgica, como las de la fundición del acero y hierro, contienen silicatos de Ca y Mg, y pueden ser usadas para neutralizar la acidez de los suelos.</p>

Tabla 4. Características de los materiales encalantes más utilizados



Figura 5. Cal agrícola en presentación de polvo

El biochar alcalino es otra alternativa para elevar el pH de suelos ácidos (Bolan et al., 2023). Es una enmienda con alto contenido de carbono, producido mediante tratamiento térmico de materiales orgánicos y bajo suministro limitado de oxígeno (O_2) (Shetty et al., 2021, citando a Lehmann y Joseph, 2009) (Figura 6).



Figura 6. Biochar de residuos de podas municipales

3.1. CALIDAD DEL ENCALANTE

Los dos principales factores que afectan la calidad de los encalantes son la composición química o pureza y la composición física o el tamaño de partícula.

La pureza se mide por su equivalencia de carbonato de calcio o Valor de Neutralización (VN), que es la capacidad de la enmienda para neutralizar la acidez del suelo comparado con el poder de neutralización del CaCO_3 químicamente puro, de manera que un mayor VN representa un mejor efecto encalante (Tabla 5). La ecuación 1 muestra cómo se calcula el valor de neutralización (Das et al., 2014).

$$\% \text{ valor de neutralización} = \frac{\text{Peso molecular o del carbonato de calcio}}{\text{Peso molecular del material encalante}} * 100 \% \quad (1)$$

MATERIAL	COMPOSICIÓN	VALOR DE NEUTRALIZACIÓN (%)
Calcita	CaCO_3	100
Dolomita	$\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$	109
Óxido de magnesio	MgO	248
Óxido de calcio	CaO	179
Hidróxido de calcio	$\text{Ca}(\text{OH})_2$	138
Hidróxido de magnesio	$\text{Mg}(\text{OH})_2$	172
Silicato de calcio	CaSiO_3	86
Silicato de magnesio	MgSiO_3	100

Tabla 5. Valor de neutralización de diferentes enmiendas para suelos ácidos (Bernier y Alfaro, 2006, citando a Campillo y Sadzawka, 1999)

El tamaño de las partículas de un material encalante influye en su capacidad para neutralizar la acidez que, debido a la mayor superficie de contacto, es mayor cuando las partículas son más pequeñas (Tabla 6).

MESH ¹	TAMAÑO DE LOS ORIFICIOS (mm)	EFICIENCIA RELATIVA (%)
<8	2.36	0
8-20	2.36-0.85	20
20-40	0.85-0.42	40
40-60	0.85-0.25	60
>60	<0.25	100

Tabla 6. Eficiencia relativa de una enmienda para suelos ácidos según el tamaño de partícula (Bernier y Alfaro, 2006)

Nota. (1) Número de orificios por pulgada cuadrada.

Poder relativo de neutralización total (PRNT)

Es un parámetro que valora en conjunto la pureza, el tamaño de partícula y el contenido de humedad (Bernier y Alfaro, 2006), calculado según la ecuación 2.

$$\text{PRNT} = \frac{\text{VN} * \text{ER}}{100} * \frac{100 - \% \text{ humedad}}{100} \quad (2)$$

El valor del PRNT, cuanto mayor sea, indica que la enmienda es más reactiva. Generalmente, este valor está indicado en la etiqueta del producto y es considerado en la recomendación de uso; por ejemplo, en cultivos de café se recomienda que el PRNT del material encalante sea de por lo menos 75 % (Espinosa y Molina, 1999, citando a Malavolta, 1993).

3.2. ÍNDICES USADOS PARA LA CORRECCIÓN DE LA ACIDEZ DEL SUELO POR ENCALADO

Los índices más usados para determinar si un suelo requiere encalado son indicados a continuación con sus respectivas ecuaciones (Fageria y Nascente, 2014, citando a Fageria et al., 2007; Fageria, 2008).

$$\text{Peso de una hectárea de suelo (t)} = 100 \text{ m} \times 100 \text{ m} \times \text{prof} \times \text{da (t/m}^3\text{)} \quad (3)$$

$$\text{CIC (cmol}_c\text{.kg}^{-1}\text{)} = \Sigma(\text{Ca}^{2+}, \text{Mg}^{2+}, \text{K}^+, \text{H}^+, \text{Al}^{3+}) \quad (4)$$

$$\text{Saturación de bases (\%)} = \frac{\Sigma(\text{Ca}^{2+}, \text{Mg}^{2+}, \text{K}^+, \text{Na}^+)}{\text{CIC}} \times 100 \% \quad (5)$$

$$\text{Saturación de aluminio (\%)} = \frac{\text{Al}^{3+}}{(\text{Ca}^{2+}, \text{Mg}^{2+}, \text{K}^+, \text{Na}^+ \text{Al}^{3+})} \times 100 \% \quad (6)$$

$$\text{Saturación de acidez (\%)} = \frac{\text{Al}^{3+} + \text{H}^+}{\text{CIC}} \times 100 \% \quad (7)$$

$$\text{Saturación de calcio (\%)} = \frac{\text{Ca}^{2+}}{\text{CIC}} \times 100 \% \quad (8)$$

$$\text{Saturación de magnesio (\%)} = \frac{\text{Mg}^{2+}}{\text{CIC}} \times 100 \% \quad (9)$$

$$\text{Saturación de potasio (\%)} = \frac{\text{K}^+}{\text{CIC}} \times 100 \% \quad (10)$$

$$\text{Relación calcio/magnesio} = \frac{\text{Ca}^{2+}}{\text{Mg}^{2+}} \quad (11)$$

$$\text{Relación calcio/potasio} = \frac{\text{Ca}^{2+}}{\text{K}^+} \quad (12)$$

$$\text{Relación magnesio/potasio} = \frac{\text{Mg}^{2+}}{\text{K}^+} \quad (13)$$

Es necesario conocer todos los índices en cada caso particular para poder determinar los requerimientos de encalado adecuados para las condiciones de suelo y cultivo.



4. Aplicación de enmiendas

Para que la aplicación del encalante sea efectiva, se debe incorporar y mezclar con el suelo que se encuentra en los primeros centímetros de profundidad (hasta 30 cm) utilizando un arado, rastra u otro implemento. Sin embargo, en algunos tipos de sistemas de cultivo, como pasturas y cultivos perennes, por ejemplo, esto no es posible por lo que en estos casos es recomendable realizar un encalado superficial con un mínimo o ningún tipo de incorporación al suelo.

Es importante tener cuidado cuando se realiza el encalado de cultivos perennes dado que es usual cometer el error de dividir la cantidad de encalante recomendado por hectárea entre el número de plantas que están en esa superficie. En este caso se debe determinar la superficie ocupada por la proyección de la copa y de acuerdo con esto ajustar la cantidad dada por hectárea para una aplicación más precisa.

$$\text{Dosis a aplicar en árboles frutales (t/ha)} = \frac{(\text{Pc} * \text{Np}) * \text{CApl}}{10000}$$

Ejemplo:

- Área total del terreno: 10 000 m² (1 ha)
- Distanciamiento entre plantas: 5 x 5 m (25 m²)
- Número de plantas: 400
- Proyección de copa: 3 x 3 m (9 m²)
- Cantidad de encalante por hectárea: 2.2 toneladas

$$\text{Dosis a aplicar en árboles frutales (t/ha)} = \frac{(9 * 400) * 2.2}{10\,000}$$

$$\text{Dosis a aplicar en árboles frutales (t/ha)} = 0.79$$

La selva peruana presenta una gran variedad de suelos, por lo que no se pueden hacer recomendaciones generales de manejo, particularmente en control de acidez; así mismo, las diferentes tolerancias al Al de los diferentes cultivos juegan un rol importante a la hora de realizar el cálculo del requerimiento del encalado (Tabla 3). En consecuencia, existen diferentes metodologías para realizar el cálculo de encalado, muchas de las cuales necesitan un conocimiento detallado sobre la mineralogía y origen del suelo a trabajar.

Con la finalidad de facilitar los cálculos, en este manual se considerará una metodología que permita realizar el requerimiento de encalado con información que el productor pueda obtener con facilidad.

Para el cálculo de requerimientos, se hará uso de la siguiente información:

- Un análisis de caracterización fisicoquímica del suelo que se procederá a encalar, del cual evaluaremos la CICE, saturación de bases, saturación de Al + H y pH.
- De no contar con esta información, será necesario utilizar las ecuaciones para obtener la CICE (ecuación 4), saturación de bases (ecuación 5), saturación de la acidez (ecuación 7).

- Porcentaje de saturación de Al + H óptimo para el cultivo a encalar
- Poder relativo de neutralización total (PRNT) (ecuación 2), para lo cual se necesitarán el valor de neutralización (Tabla 5) y la eficiencia relativa (Tabla 6).
- La fórmula para el cálculo de fertilización que se utilizará es la siguiente (De Lima et al., 2020):

$$\text{CaCO}_3 \text{ (t/ha)} = \frac{(\text{P1} - \text{P2}) * (\text{CICe})}{100} * \frac{100}{\text{PRNT}}$$

Donde:

P1 = Porcentaje de acidez intercambiable que presenta el suelo

P2 = Porcentaje de acidez intercambiable deseado

4.1. ENCALADO EN MAÍZ

Entre las más importantes limitaciones para la producción de maíz se encuentra la aparición de suelos ácidos. En varios estudios se han visto reducciones considerables en el rendimiento de grano del maíz en suelos con un pH bajo, incluso en un rango de 2.8 a 71 % (Hayati et al., 2014). La variación en la reducción del rendimiento se basaría en el nivel de acidez del suelo, las condiciones agroclimáticas del medio ambiente y el potencial genético de los genotipos de maíz (Ngoune-Tandzi et al., 2018).

Para este ejemplo se usarán los datos presentados en la Tabla 7:

pH	Ca	Mg	K	Na	Al+H	CICe	Sat. Bases	Ac. Int.
	meq/100g						%	%
3.91	0.99	0.35	0.77	0.37	2.10	4.58	54.05	45.95

Tabla 7. Datos de análisis de un suelo utilizados como ejemplo para calcular el requerimiento de un agente encalante

- Como agente encalante usaremos calcita (CaCO_3) con un valor relativo de neutralización (VN) de 80 %, una eficiencia relativa (ER) de 60 % y una humedad del 10 %.
- El encalado se llevará a cabo hasta llegar a una acidez intercambiable de 25 %, tomando de referencia la saturación de Al tolerada (Tabla 3).
- El PRNT sería el siguiente:

$$\text{PRNT} = \frac{80 * 60}{100} * \frac{100 - 10}{100}$$

$$\text{PRNT} = 43.2$$

- La fórmula para el cálculo de fertilización resultante es la siguiente:

$$\text{CaCO}_3 \text{ (t/ha)} = \frac{(45.95 - 25) * (4.58)}{100} * \frac{100}{43.2}$$

$$\text{CaCO}_3 \text{ (t/ha)} = 2.22$$

La calcita se aplica al voleo e incorporada al suelo con la rastra a unos 10 cm de profundidad antes de la siembra sólo al primer ciclo de cultivo. Una alternativa es la aplicación superficial de la cal sin incorporar al suelo, removiendo con un pequeño rastrillo para incorporar a 1 cm de profundidad y evitar su arrastre con el riego.

4.2. ENCALADO EN FRIJOL

Los rendimientos del frijol común son limitados severamente por factores de estrés abiótico que incluyen a la sequía y la toxicidad por aluminio (Beebe et al., 2009).

Para el ejemplo de encalado en este cultivo se usarán los datos mostrados en la Tabla 8:

pH	Ca	Mg	K	Na	Al+H	ClCe	Sat. Bases	Ac. Int
meq/100g							%	%
3.45	0.50	0.03	0.24	0.29	3.40	4.46	23.77	76.23

Tabla 8. Datos de análisis de un suelo utilizados como ejemplo para calcular el requerimiento de un agente encalante

- Como agente encalante usaremos dolomita ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) con un valor relativo de neutralización (VN) de 109 %, una eficiencia relativa (ER) de 80 % y una humedad del 15 %.
- El encalado se llevará a cabo hasta llegar a una acidez intercambiable de 20 % (Tabla 3).
- El PRNT sería el siguiente:

$$\text{PRNT} = \frac{109 * 80}{100} * \frac{100 - 15}{100}$$

$$\text{PRNT} = 74.12$$

- La fórmula para el cálculo de fertilización resultante es la siguiente:

$$\text{CaCO}_3 \text{ (t/ha)} = \frac{(76.23 - 20) * (4.46)}{100} * \frac{100}{74.12}$$

$$\text{CaCO}_3 \text{ (t/ha)} = 3.38$$

La dolomita se aplica al voleo un mes antes de la siembra y se incorpora con azadón.

4.3. ENCALADO EN PIÑA

Para este ejemplo se usarán los datos presentados en la Tabla 9:

pH	Ca	Mg	K	Na	Al+H	CICe	Sat. Bases	Ac. Int
							%	%
3.27	0.58	0.22	0.38	0.32	3.85	5.35	28.04	71.96

Tabla 9. Datos de análisis de un suelo utilizados como ejemplo para calcular el requerimiento de un agente encalante

- Como agente encalante usaremos hidróxido de calcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) con un valor relativo de neutralización (VN) de 130 %, una eficiencia relativa (ER) de 75 % y una humedad del 20 %.
- El encalado se llevará a cabo hasta llegar a una acidez intercambiable de 30 % (Tabla 3).
- El PRNT sería el siguiente:

$$\text{PRNT} = \frac{130 * 75}{100} * \frac{100 - 20}{100}$$

$$\text{PRNT} = 78.00$$

- La fórmula para el cálculo de fertilización resultante es la siguiente:

$$\text{CaCO}_3 \text{ (t/ha)} = \frac{(71.96 - 30) * (5.35)}{100} * \frac{100}{7}$$

$$\text{CaCO}_3 \text{ (t/ha)} = 2.88$$

El momento de aplicación del hidróxido de calcio es 30 días antes de la siembra.

4.4. ENCALADO EN CACAO

Existen pocas publicaciones que relacionan el crecimiento del cacao en suelos ácidos y la demanda de nutrientes. La acidez es un importante factor de degradación de los suelos con cultivo de cacao. Las restricciones por acidez del suelo, especialmente de Al intercambiable en el crecimiento y la nutrición mineral del cacao no son del todo comprendidas (Baligar y Fageria, 2005).

Para este ejemplo se usarán los datos indicados en la Tabla 10:

pH	Ca	Mg	K	Na	Al+H	ClCe	Sat. Bases	Ac. Int
meq/100g							%	%
4.03	0.54	0.05	0.26	0.39	3.70	4.94	25.10	74.90

Tabla 10. Datos de análisis de un suelo utilizados como ejemplo para calcular el requerimiento de un agente encalante

- Como agente encalante usaremos dolomita ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) con un valor relativo de neutralización (VN) de 105 %, una eficiencia relativa (ER) de 100 % y una humedad del 10 %.
- El encalado se llevará a cabo hasta llegar a una acidez intercambiable de 30 % (Tabla 3).
- Se trabajaría con 1000 plantas/ha, con una proyección de copa de 6.25 m².
- El PRNT sería el siguiente:

$$\text{PRNT} = \frac{105 * 100}{100} * \frac{100 - 10}{100}$$

$$\text{PRNT} = 94.50$$

- La fórmula para el cálculo de fertilización resultante es la siguiente:

$$\text{CaCO}_3 \text{ (t/ha)} = \frac{(74.90 - 30) * (4.94)}{100} * \frac{100}{94.50}$$

$$\text{CaCO}_3 \text{ (t/ha)} = 2.35$$

- La dosis a aplicar en el cacao sería:

$$\text{Dosis a aplicar en plantaciones de cacao (t/ha)} = \frac{(6.25 * 1000) * 2.35}{10\ 000}$$

$$\text{Dosis a aplicar en plantaciones de cacao (t/ha)} = 1.47$$

La incorporación de dolomita se realiza al iniciar la época lluviosa, en la zona circular de 50-60 cm alrededor de la planta o de los árboles de cacao, en forma homogénea, con un cernidor.

4.5. ENCALADO EN CAFÉ

Las plantaciones de café están confinadas principalmente en suelos ácidos, donde se encuentran varias formas tóxicas de Al, como el $\text{Al}(\text{OH})_3$, que provocan inhibición de la elongación radicular, síntoma más destacado de la toxicidad por Al y es una medida ampliamente aceptada del estrés por este elemento (Martínez-Estévez et al., 2001).

Para este ejemplo se usarán los datos señalados en la Tabla 11.

pH	Ca	Mg	K	Na	Al+H	CICe	Sat. Bases	Ac. Int
	meq/100g						%	%
3.28	0.40	0.13	0.25	0.32	5.25	6.35	17.33	82.67

Tabla 11. Datos de análisis de un suelo utilizados como ejemplo para calcular el requerimiento de un agente encalante

- Como agente encalante usaremos calcita (CaCO_3) con un valor relativo de neutralización (VN) de 95 %, una eficiencia relativa (ER) de 80 % y una humedad del 15 %.
- El encalado se llevará a cabo hasta llegar a una acidez intercambiable de 25 % (Tabla 3).
- Se trabajaría con 2500 plantas/ha, con una proyección de copa de 3 m².

- El PRNT sería el siguiente:

$$\text{PRNT} = \frac{95 * 80}{100} * \frac{100 - 15}{100}$$

$$\text{PRNT} = 64.60$$

- La fórmula para el cálculo de fertilización resultante es la siguiente:

$$\text{CaCO}_3 \text{ (t/ha)} = \frac{(82.67 - 25) * (6.35)}{100} * \frac{100}{64.60}$$

$$\text{CaCO}_3 \text{ (t/ha)} = 5.66$$

- La dosis a aplicar en el café sería:

$$\text{Dosis a aplicar en plantaciones de café (t/ha)} = \frac{(3 * 2500) * 5.66}{10\ 000}$$

$$\text{Dosis a aplicar en plantaciones de café (t/ha)} = 4.25$$

La incorporación de calcita se realiza en la zona de plateo de los árboles de café en forma homogénea con un cernidor.

Lugar	pH	CE	Carbo	MO	P	K	A	Li	Ar	Textura	CIC	Ca	Mg	K	Na	Al+H	Sat.	Ac.
		dS/m	natos	%	ppm	%	%	%	%		%	meq/100g	%	%				
Zona 1	3.91	0.27	0	0.86	2.7	328	42	18	40	Ar.	8.64	0.99	0.35	0.77	0.37	2.10	54.05	45.95
Zona 2	3.45	0.20	0	1.35	4.2	84	46	34	20	Fr.	9.12	0.50	0.03	0.24	0.29	3.40	23.77	76.23
Zona 3	3.27	0.38	0	3.08	4.6	167	60	20	20	Fr.Ar.A.	11.20	0.58	0.22	0.38	0.32	3.85	28.04	71.96
Zona 4	4.03	0.03	0	2.75	4.1	83	42	36	22	Fr.	11.20	0.54	0.05	0.26	0.39	3.70	25.10	74.90
Zona 5	3.28	0.12	0	3.79	4.4	83	34	34	32	Fr.Ar.	13.92	0.40	0.13	0.25	0.32	5.25	17.33	82.67

Tabla 12. Resumen de características fisicoquímicas





5. Conclusiones

- Para contrarrestar la acidez en los suelos y la toxicidad de Al, se propone como alternativa de solución la aplicación de cal, roca fosfórica y materia orgánica, así como la fitorremediación y mejoramiento genético de plantas. Sin embargo, se recomienda la práctica del encalado, puesto que constituye una alternativa ecológica de bajo costo y uso simple.
- Entre los beneficios del encalado se encuentra la elevación del pH. Según sea la enmienda, se da un aporte significativo de Ca y/o Mg. Además, esta práctica incrementa la disponibilidad de nutrientes del suelo.
- Su aplicación al suelo promueve la actividad microbiana, incrementando principalmente a la población bacteriana, la cual cumple un rol importante en los diversos ciclos biogeoquímicos.
- La corrección de la acidez del suelo con encalado resulta en beneficios inmediatos para la producción agrícola, que a largo plazo contribuye a la sostenibilidad de los sistemas agrarios y seguridad alimentaria.



6. Referencias bibliográficas

- Abate, E., Hussein, S., Laing, M., y Mengistu, F. (2017). Soil acidity under multiple land-uses: assessment of perceived causes and indicators, and nutrient dynamics in small-holders' mixed-farming system of northwest Ethiopia. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B—Soil & Plant Science*, 67(2), 134-147. <https://doi.org/10.1080/09064710.2016.1230227>
- Alhussaen, K. M. (2012). Effect of Soil Acidity on Diseases Caused by *Pythium ultimum* and *Fusarium oxysporum* on Tomato Plants. *Journal of Biological Sciences*, 12(7), 416-420. <https://doi.org/10.3923/jbs.2012.416.420>
- Arévalo-Gardini, E., Canto, M., Alegre, J., Loli, O., Julca, A., y Baligar, V. (2015). Changes in Soil Physical and Chemical Properties in Long Term Improved Natural and Traditional Agroforestry Management Systems of Cacao Genotypes in Peruvian Amazon. *PLOS ONE*, 10(7), e0132147. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0136784.s002>
- Arévalo-Hernández, C. O., Arévalo-Gardini, E., Farfan, A., Amaringo-Gomez, M., Daymond, A., Zhang, D., y Baligar, V. C. (2022). Growth and Nutritional Responses of Juvenile Wild and Domesticated Cacao Genotypes to Soil Acidity. *Agronomy*, 12(12), 3124. <https://doi.org/10.3390/agronomy12123124>
- Baligar, V. C., y Fageria, N. K. (2005). Soil Aluminum Effects on Growth and Nutrition of Cacao. *Soil Science and Plant Nutrition*, 51(5), 709-713. <https://doi.org/10.1111/j.1747-0765.2005.tb00097.x>

- Beebe, S. E., Rao, I. M., Blair, M. W., y Butare, L. (2009). *Breeding for Abiotic Stress Tolerance in Common Bean: Present and Future Challenges*. En 14th Australasian Plant Breeding (APB) Conference and 11th Society for the Advancement of Breeding Researches in Asia and Oceania (SABRAO) Conference [Proceedings]. <https://hdl.handle.net/10568/56184>
- Beegle, D. B., y Lingenfelter, D. D. (2001). *Soil Acidity and Aglime*. Agronomy Facts 3, UC038. Penn State Extension, Pennsylvania State University. https://extension.psu.edu/downloadable/download/sample/sample_id/16493/
- Bernier, R., y Alfaro, M. (2006). *Acidez de los suelos y efectos del encalado*. Boletín INIA N° 151. Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA). <https://hdl.handle.net/20.500.14001/7075>
- Bloom, P. R., Skyllberg, U. L., y Sumner, M. E. (2005). Soil Acidity. En M. A. Tabatabai, y D. L. Sparks (Eds.), *Chemical Processes in Soils*, SSSA Book Series No. 8 (pp. 411-459). Soil Science Society of America (SSSA). <https://doi.org/10.2136/sssabookser8.c8>
- Bolan, N. S., y Hedley, M. J. (2003). Role of Carbon, Nitrogen, and Sulfur Cycles in Soil Acidification. En Z. Rengel (Ed.), *Handbook of Soil Acidity* (pp. 29-56). Marcel Dekker, Inc. <https://doi.org/10.1201/9780203912317>
- Bolan, N., Sarmah, A. K., Bordoloi, S., Bolan, S., Padhye, L. P., Zwieten, L. V., Sooriyakumar, P., Khan, B. A., Ahmad, M., Solaiman, Z. M., Rinklebe, J., Wang, H., Singh, B. P., y Siddique, K. H. M. (2023). Soil acidification and the liming potential of biochar. *Environmental Pollution*, 317, 120632. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.120632>
- Butterly, C. R., Amado, T. J. C., y Tang, C. (2022). Soil Acidity and Acidification. En T. S. de Oliveira y R. W. Bell (Eds.), *Subsoil Constraints for Crop Production* (pp. 53-81). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-031-00317-2_3
- Das, S. K., Avasthe, R. K., y Reza, S. K. (2014). Management of soil acidity. En R. Avasthe, Y. Pradhan, y K. Bhutia (Eds.), *Handbook of Organic Crop Production in Sikkim* (pp. 307-309). Sikkim Organic Mission, Government of Sikkim, & ICAR Research Complex for NEH Region.
- De Lima, W.C., Alves, E., y de França, J. (2020). Avaliação da fertilidade do solo. En E. A. de Araújo, W. C. de Lima, J. de França, et al. (Eds.), *Aspectos relevantes do sistema de produção de culturas agrícolas prioritárias para o município de Cruzeiro do Sul, Acre. Ênfase ao manejo da fertilidade dos solos* (pp. 57-73). Editora Itacaiúnas. Ananindeua-PA.
- Hayati, P. K. D., Sutoyo, S., Syarif, A., y Prasetyo, T. B. (2014). Performance of Maize Single-Cross Hybrids Evaluated on Acidic Soils. *International Journal on Advanced Science, Engineering and Information Technology*, 4(3), 30-33. <https://insightsociety.org/ojaseit/index.php/ijaseit/article/view/390/419>
- Espinosa, J., y Molina, E. (1999). *Acidez y encalado de los suelos*. International Plant Nutrition Institute (IPNI). [http://nla.ipni.net/ipniweb/region/nla.nsf/e0f085ed5f091b1b852579000057902e/c093707b0327c2fe05257a40005f359f/\\$FILE/L%20Acidez.002.pdf/](http://nla.ipni.net/ipniweb/region/nla.nsf/e0f085ed5f091b1b852579000057902e/c093707b0327c2fe05257a40005f359f/$FILE/L%20Acidez.002.pdf/)

- Fageria, N. K., y Nascente, A. S. (2014). Management of Soil Acidity of South American Soils for Sustainable Crop Production. *Advances in Agronomy*, 128, 221-275. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-802139-2.00006-8>
- Filipek, T. (2011). Liming, Effects on Soil Properties. En J. Gliński, J. Horabik, y J. Lipiec (Eds.), *Encyclopedia of Agrophysics* (pp. 425-428). Springer, Dordrecht. https://doi.org/10.1007/978-90-481-3585-1_84
- Getaneh, S., y Kidanemariam, W. (2021). Soil Acidity and Its Managements: A Review. *International Journal of Advanced Research in Biological Sciences*, 8(3), 70-79. <https://ijarbs.com/pdfcopy/2021/mar2021/ijarbs8.pdf>
- 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>
- Harries, E., Berruezo, L. A., Galván, M. Z., Rajal, V. B., y Mercado-Cárdenas, G. E. (2020). Soil properties related to suppression of *Rhizoctonia solani* on tobacco fields from northwest Argentina. *Plant Pathology*, 69(1), 77-86. <https://doi.org/10.1111/ppa.13106>
- Kicińska, A., Pomykała, R., y Izquierdo-Díaz, M. (2022). Changes in soil pH and mobility of heavy metals in contaminated soils. *European Journal of Soil Science*, 73(1), e13203. <https://doi.org/10.1111/ejss.13203>
- Loekito, S., Afandi, Afandi, A., Nishimura, N., Koyama, H., y Senge, M. (2022). Study on Soil Properties and Species Conformity of *Phytophthora* Species in a Pineapple Field. *International Journal of Agriculture & Biology*, 27(5), 361-370. [https://www.fsublishers.org/published_papers/35139_07%20doi%2015.1936%20IJAB-22-0148%20\(10\)%20361-370.pdf](https://www.fsublishers.org/published_papers/35139_07%20doi%2015.1936%20IJAB-22-0148%20(10)%20361-370.pdf)
- Martínez-Estévez, M., Muñoz-Sánchez, J., Loyola-Vargas, V., y Hernández-Sotomayor, S. (2001). Modification of the culture medium to produce aluminum toxicity in cell suspensions of coffee (*Coffea arabica* L.). *Plant Cell Reports*, 20, 469-474. <https://doi.org/10.1007/s002990100332>
- Molina, E. (1998). *Encalado para la corrección de la acidez del suelo*. Asociación Costarricense de la Ciencia del Suelo (ACCS).
- Myers, R. J. K., y De Pauw, E. (1995). Strategies for the management of soil acidity. In *Plant-Soil Interactions at Low pH: Principles and Management: Proceedings of the Third International Symposium on Plant-Soil Interactions at Low pH, Brisbane, Queensland, Australia, 12-16 September 1993* (pp. 729-741). Springer Netherlands.
- Ngoune-Tandzi, L., Mutengwa, C. S., Ngonkeu, E. L. M., y Gracen, V. (2018). Breeding Maize for Tolerance to Acidic Soils: A Review. *Agronomy*, 8(6), 84. <http://dx.doi.org/10.3390/agronomy8060084>
- Opala, P. A., Odendo, M., y Muyekho, F. N. (2018). Effects of lime and fertilizer on soil properties and maize yields in acid soils of Western Kenya. *African Journal of Agricultural Research*, 13(13), 657-663. <https://doi.org/10.5897/AJAR2018.13066>

- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). (s. f.). *Suelos ácidos. Portal de Suelos de la FAO*. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). Recuperado el 25 de agosto de 2023 de <https://www.fao.org/soils-portal/soil-management/manejo-de-suelos-problematicos/suelos-acidos/es/>
- Porta-Casanellas, J., López-Acevedo-Reguerín, M., y Roquero-de Laburu, C. (2003). *Edafología para la agricultura y el medio ambiente* (3.ª ed.). Ediciones Mundi-Prensa.
- Rosas-Patiño, G., Puentes-Páramo, Y. J., y Menjivar-Flores, J. C. (2021). Efecto del pH sobre la concentración de nutrientes en cacao (*Theobroma cacao* L.) en la Amazonia Colombiana. *Revista U. D. C. A Actualidad & Divulgación Científica*, 24(1), e1643. <https://doi.org/10.31910/rudca.v24.n1.2021.1643>
- Sanchez, P. A. (2019). *Properties and Management of Soils in the Tropics* (p. 666). <https://doi.org/10.1017/9781316809785>
- Shetty, R., Vidya, C. S.-N., Prakash, N. B., Lux, A., Vaculík, M. (2021). Aluminum toxicity in plants and its possible mitigation in acid soils by biochar: A review. *Science of the Total Environment*, 765, 142744. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142744>
- Stătescu, F., Zaucă, D. C., y Pavel, L. V. (2013). Soil structure and water-stable aggregates. *Environmental Engineering and Management Journal*, 12(4), 741-746. https://www.researchgate.net/profile/Lucian-Pavel/publication/288103987_Soil_structure_and_water-stable_aggregates/links/56a89cf208aeded22e38d57c/Soil-structure-and-water-stable-aggregates.pdf
- Wang, Y., Yao, Z., Zhan, Y., Zheng, X., Zhou, M., Yan, G., y Butterbach-Bahl, K. (2021). Potential benefits of liming to acid soils on climate change mitigation and food security. *Global Change Biology*, 27(12), 2807-2821. <https://doi.org/10.1111/gcb.15607>
- Weil, R. R. y Brady, N. C. (2017). Soil Acidity. En R.R. Weil y N. C. Brady (Eds.), *The Nature and Properties of Soils* (pp. 374-419). Pearson Education.



Instituto Nacional de Innovación Agraria

D. : Av. La Molina 1981, La Molina
T. : (511) 240-2100 / 240-2350
www.gob.pe/inia

ISBN: 978-9972-44-155-4



PERÚ

Ministerio
de Desarrollo Agrario
y Riego



Instituto Nacional de Innovación Agraria

 @INIAPeru  @INIAPeru  @iniaperu  @IniaPeru  @iniaperu  @iniaperu