

Transición de agroecosistemas cafeteros a bosques nativos: diagnóstico y propuesta de manejo de la acidez del suelo para la restauración ecológica en el Líbano, Tolima

Transition from Coffee Agroecosystems to Native Forests: Diagnosis and Management Proposal for Soil Acidity for Ecological Restoration in Líbano, Tolima

Autores:

Dairo Alexander Arango – *Universidad del Tolima, Colombia* –
daarangov@ut.edu.co

Brayan Esteban Rengifo – *Universidad del Tolima, Colombia* –
berengifop@ut.edu.co

Jesús Andrés Álvarez – *Universidad del Tolima, Colombia* –
jaalvarezpi@ut.edu.co

Resumen

El manejo agronómico convencional de la caficultura intensiva en el municipio de El Líbano, Tolima, ha generado procesos de acidificación y degradación química del suelo. Este estudio evaluó las propiedades edáficas y el estatus de acidez de un suelo cafetalero en transición hacia la restauración ecológica, con el propósito de estructurar una propuesta de manejo biogeoquímico de bajos insumos para el componente forestal nativo. Mediante un muestreo aleatorio en una hectárea de estudio, se determinaron los valores de pH (H_2O , $CaCl_2$ y KCl), la acidez y el aluminio intercambiable. Los resultados indicaron un pH (H_2O) de 5.0 (fuertemente ácido) y un Delta de pH negativo ($\Delta pH = -0.8$), lo que evidencia una matriz dominada por coloides de carga variable y una capacidad de intercambio catiónico efectiva restringida. Notablemente, la prueba de NaF fue negativa, descartando contenido de aluminio amorfo activo, lo que reduce el riesgo de fijación

irreversible de fósforo y se alinea con una acidez intercambiable moderada a baja (0.8 meq/100g). Se concluye que el ecosistema en transición no requiere intervenciones químicas severas; en su lugar, se diseñó un plan integrado que prescinde de síntesis industrial. Este plan se basa en dosis bajas y localizadas de cal dolomita (500-700 kg/ha) para neutralizar la acidez activa y aportar Ca^{2+} y Mg^{2+} , la adición de compost o vermicompost (1-2 kg/hoyo) como amortiguador químico, e inoculación con consorcios nativos de Hongos Micorrícicos Arbusculares (HMA) para optimizar el entorno radicular y potenciar la regeneración del bosque nativo de forma sostenible.

Palabras clave: Química del Suelo; Agroecología; Restauración ecológica; Acidez del suelo; Hongos micorrícicos arbusculares.

Abstract

Conventional agronomic management of intensive coffee farming in the municipality of El Líbano, Tolima, has triggered soil acidification and chemical degradation processes. This study evaluated the edaphic properties and acidity status of a coffee-growing soil in transition towards ecological restoration, aiming to design a low-input biogeochemical management proposal for the native forest component. Using random sampling within a one-hectare study area, pH values (H_2O , CaCl_2 and KCl), exchangeable acidity, and exchangeable aluminum were determined. The results showed an H_2O pH of 5.0 (strongly acidic) and a negative Delta pH, $\Delta\text{pH} = -0.8$, evidence of a matrix dominated by variable-charge colloids and a restricted effective cation exchange capacity. Notably, the NaF test was negative, ruling out active amorphous aluminum content, which reduces the risk of irreversible phosphorus fixation and aligns with a moderate-to-low exchangeable acidity 0.8 meq/100g.

It is concluded that the ecosystem in transition does not require severe chemical interventions; instead, an integrated plan free of industrial synthesis was designed. This

plan is based on low, localized doses of dolomite lime (500–700 kg/ha) to neutralize active acidity and supply Ca^{2+} y Mg^{2+} , the addition of compost or vermicompost (1–2 kg/hole) as a chemical buffer, and inoculation with native consortia of Arbuscular Mycorrhizal Fungi (AMF) to optimize the root environment and sustainably enhance native forest regeneration.

Keywords: Soil Chemistry; Agroecology; Ecological restoration; Soil acidity; Arbuscular mycorrhizal fungi.

Introducción

La degradación química y estructural de los suelos tropicales debido a prácticas agrícolas de carácter intensivo representa uno de los mayores desafíos ambientales en Colombia, un territorio donde los suelos de naturaleza ácida abarcan más del 80% del área nacional (Zapata, 2002). En la región andina, y de manera histórica en el departamento del Tolima, la caficultura a libre exposición solar ha dejado una huella profunda en las matrices edáficas. El manejo agronómico convencional prolongado, caracterizado por la aplicación recurrente de fertilizantes nitrogenados de reacción ácida como la urea, el fosfato monoamónico o el sulfato de amonio, acelera los procesos de acidificación debido a la liberación masiva de iones hidrógeno H^+ durante el proceso biológico de nitrificación (Sadeghian, 2016). Esta dinámica se ve intensificada por la remoción constante de cationes básicos Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ absorbidos por las cosechas de alta densidad y por la lixiviación acelerada causada por los regímenes de precipitación locales, lo cual disminuye la capacidad de intercambio catiónico efectiva (CICE) y vulnera la estabilidad estructural del suelo (Sadeghian, 2016).

Cuando un sistema productivo de café cesa sus actividades comerciales y entra en una etapa de transición hacia la restauración ecológica, las prioridades de intervención cambian radicalmente. Mientras que en la fase productiva el manejo edáfico busca rangos

de pH estrictamente comerciales situados de manera idónea entre 5.0 y 5.5 para optimizar el rendimiento del café (Sadeghian, 2016), en los escenarios de restauración el objetivo primordial migra hacia el restablecimiento de las funciones ecosistémicas, la reactivación de los ciclos biogeoquímicos y la facilitación de la sucesión vegetal nativa. En estos entornos en recuperación, la distribución de los nutrientes a lo largo del perfil responde a controles edáficos específicos donde variables como el pH, el carbono orgánico y las interacciones de la fracción de arcilla regulan la disponibilidad real de elementos esenciales bajo patrones de convergencia estequiométrica (Zheng & Ren, 2026).

La corrección tradicional de la acidez en suelos cultivados recurre a encalados masivos orientados principalmente a precipitar el aluminio intercambiable Al^{3+} , cuya presencia en la solución del suelo incluso en concentraciones ínfimas resulta fitotóxica, inhibe la elongación radicular y bloquea la asimilación de agua y fósforo (Rosas et al., 2025). No obstante, los procesos de restauración ecológica demandan enfoques de manejo integrados y de bajos insumos que eviten el sobre-encalamiento, un fenómeno perjudicial que altera el balance nutricional e induce deficiencias severas de micronutrientes (Sadeghian, 2016). El diseño de enmiendas complejas que combinan materiales de distinta reactividad tales como la cal dolomítica acoplados con aportes orgánicos estables ha demostrado ser una estrategia altamente eficiente en suelos colombianos, ya que promueve la neutralización de la acidez residual, incrementa la biodisponibilidad de fósforo y optimiza las propiedades físicas con dosis sustancialmente menores a las requeridas mediante el uso exclusivo de cal pura (Castro & Munévar, 2013).

Bajo este contexto, el municipio de El Líbano, Tolima, presenta áreas de antiguos cafetales que actualmente se integran a programas de conservación y restauración ecológica. Evaluar con precisión el estado actual de estos suelos mediante indicadores

analíticos multifacéticos constituye un paso indispensable. Por consiguiente, el objetivo de esta investigación fue evaluar las propiedades edáficas y el estatus de acidez de un suelo de origen cafetalero en proceso de transición hacia la restauración ecológica en el municipio de El Líbano, Tolima, con el propósito de diagnosticar la respuesta potenciométrica del complejo coloidal y estructurar una propuesta de manejo biogeoquímico de bajos insumos adaptada al desarrollo forestal sucesional.

Metodología

Localización del Área de Estudio

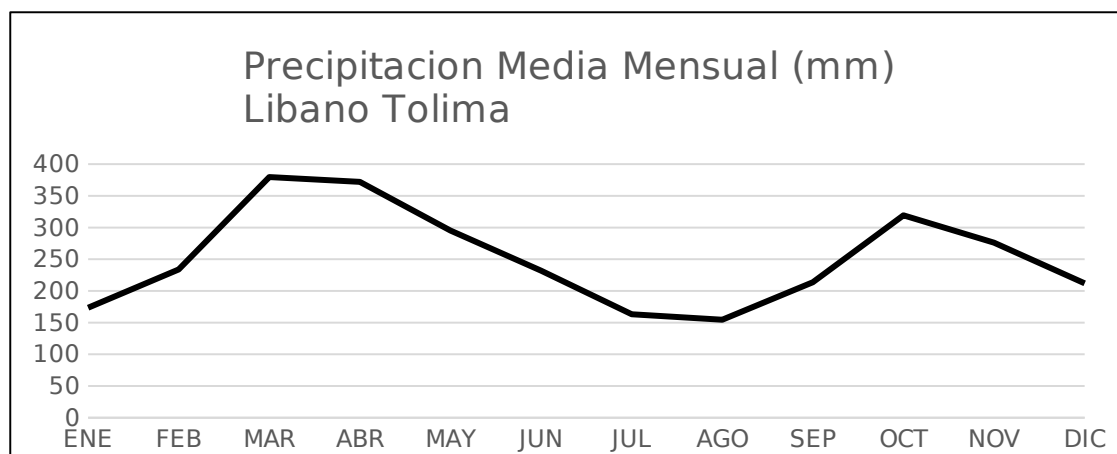
El estudio se llevó a cabo en un predio rural previamente dedicado a la caficultura intensiva, actualmente destinado a la agroecología y conservación, ubicado en el municipio de El Líbano, al norte del departamento del Tolima, Colombia.

Geográficamente, la zona se localiza en la vertiente oriental de la cordillera central andina, con coordenadas de referencia de 4°55'3,27" N y 75°04'59,05" W. La altitud promedio del área de estudio se sitúa en el cinturón cafetero altitudinal entre los 1.700 y 1.800 m.s.n.m.

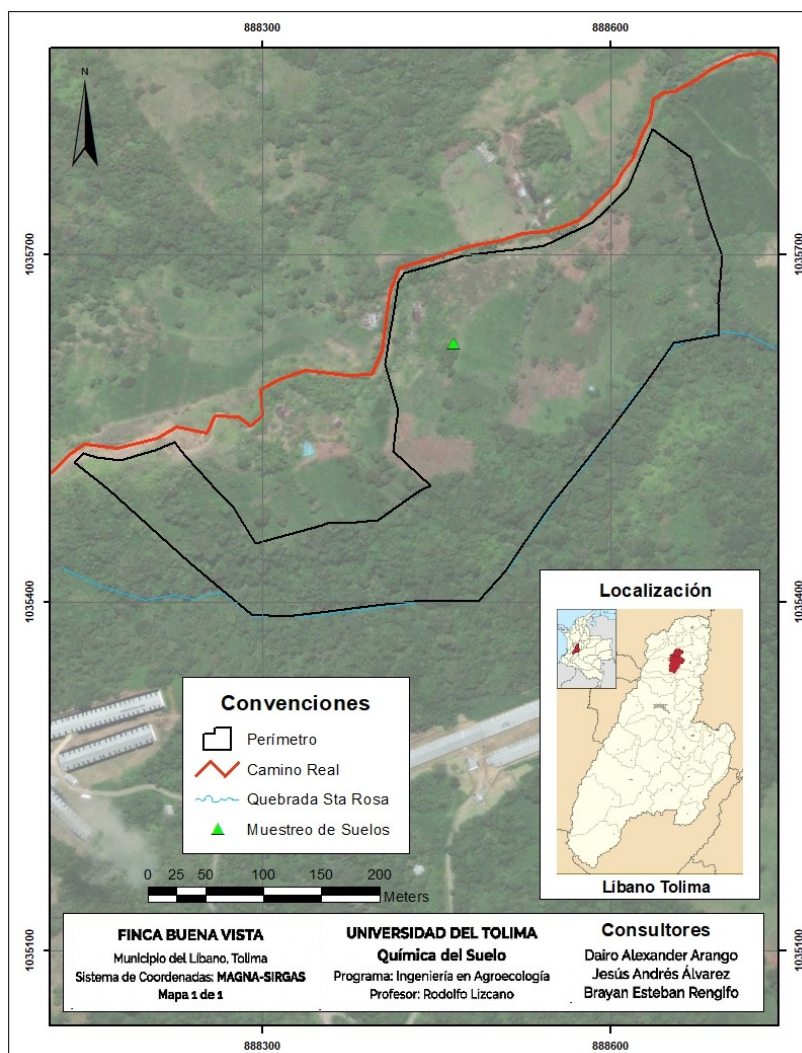
Condiciones Climáticas

La zona responde a las dinámicas de la Zona de Confluencia Intertropical (ZCIT), exhibiendo un régimen de precipitación marcadamente bimodal, con un promedio anual acumulado que oscila entre los 2.100 y 2.400 mm. Los periodos lluviosos se concentran entre marzo-mayo y septiembre-noviembre, intercalados por fases de menores precipitaciones en los meses de enero-febrero y julio-agosto. La temperatura media anual es de 19.5°C con una tendencia isotérmica tropical típica de alta montaña (amplitud mensual <1.5°C) y una humedad relativa constante del 82% regulada por nubosidad orográfica.

Gráfico 1. Precipitación Media



Mapa 1. Ubicación geográfica del área de estudio



Protocolo de Muestreo y Análisis de Laboratorio

Se implementó un diseño de muestreo aleatorio en un área homogénea de una hectárea en transición sucesional. Se trazó un recorrido en zigzag para recolectar un total de 5 submuestras a una profundidad fija de 0–20 cm (horizonte diagnóstico arable influenciado por la fertilización histórica). Previo a la extracción con palín, se removió la hojarasca superficial sin alterar el suelo mineral. Las submuestras se homogenizaron en un balde plástico libre de contaminantes para constituir una muestra compuesta de aproximadamente 1 kg, guardada en bolsas herméticas y remitida al laboratorio.

Los análisis físico-químicos se realizaron siguiendo los protocolos estándar descritos por Lizcano et al. (2017).

pH Potenciométrico

Determinado en tres matrices de suspensión en relación 1:1: agua destilada (pH H₂O), Cloruro de Calcio 0.01 M (pH CaCl₂) y Cloruro de Potasio 1 M (pH KCl).

Acidez Intercambiable (Al³⁺ + H⁺): Extraída con KCl 1 M y determinada mediante titulación volumétrica con NaOH.

Prueba de Fluoruro de Sodio (NaF)

Evaluación cualitativa para identificar la presencia de aluminio activo amorfo o propiedades andisólicas, midiendo el viraje con fenolftaleína.

Delta de pH (Δ pH): Calculado mediante la ecuación estándar de balance de cargas: Δ pH = pH KCl - pH H₂O

Imagen 1. Toma de Muestras



Resultados y Discusión

Los análisis analíticos del suelo bajo estudio revelan las condiciones químicas remanentes tras el cese de la caficultura intensiva (Tabla 1).

Tabla 1. Propiedades químicas y estado de acidez del suelo evaluado

Variable Analítica	Valor Obtenido	Calificación Agronómica
pH en Agua (relación 1:1)	5.0	Fuertemente Ácido
pH en Cloruro de Calcio (CaCl_2 , 0.01 M)	4.4	Extremadamente Ácido
pH en Cloruro de Potasio (KCl, 1 M)	4.2	Extremadamente Ácido
Acidez Intercambiable $\text{Al}^{3+} + \text{H}^+$	0.8 meq/100g	Moderadamente Baja
Prueba de Fluoruro de Sodio (NaF)	Negativa	Ausencia de Aluminio Activo Amorfo

Fuente: Elaboración propia basada en los datos de laboratorio analizados.

Análisis Crítico de la Dinámica Potenciométrica y Carga Coloidal

El valor de pH H₂O de 5.0 califica formalmente al suelo como fuertemente ácido. Esta condición fenotípica edáfica es consistente con el manejo agronómico histórico; la fertilización nitrogenada intensiva prolongada induce de forma inequívoca la desaturación de bases y la acumulación de hidrogeniones (H⁺) en la solución debido a la nitrificación del amonio (Sadeghian, 2016). El valor de pH CaCl₂ de 4.4, al disminuir en 0.6 unidades respecto al agua, refleja la atenuación del "efecto de suspensión" y simula de forma más realista la concentración iónica que experimentan las raíces *in situ*.

El cálculo del Delta de pH arrojó un valor neto negativo: $\Delta\text{pH} = 4.2 - 5.0 = -0.8$. Este signo negativo ($\Delta\text{pH} = -0.8$) constata de manera inequívoca que el suelo posee una carga neta negativa en sus complejos de cambio. Los suelos de la zona cafetera del Tolima suelen presentar minerales de carga variable (caolinitas y óxidos de hierro y aluminio) junto a materia orgánica, cuya capacidad de intercambio catiónico efectiva (CICE) depende estrechamente del pH del medio (Sadeghian, 2016). Un pH de 5.0 restringe drásticamente la CICE, reduciendo los sitios disponibles para retener nutrientes vitales y propiciando la lixiviación de cationes básicos (Ca²⁺, Mg²⁺, K⁺) bajo el régimen pluvial bimodal de la región (Sadeghian, 2016).

Implicaciones de la Prueba de NaF Negativa y Disponibilidad de Nutrientes

Un hallazgo de alto valor diagnóstico es el resultado negativo en la prueba cualitativa de Fluoruro de Sodio (NaF). En suelos con minerales amorfs de corto rango (alófana, imogolita o complejos humus-Aluminio reactivo, típico de Andisoles), el ion fluoruro (F⁻) desplaza masivamente a los grupos hidroxilo (OH⁻) coordinados con el aluminio activo, elevando instantáneamente el pH de la suspensión por encima de 9.4 (Lizcano et al., 2017).

Al ser negativa la prueba, se descarta categóricamente un comportamiento andisólico dominante o la presencia de geles de aluminio amorfo altamente reactivos. Las

consecuencias biogeoquímicas de este fenómeno para la restauración ecológica son altamente favorables.

Dinámica del Fósforo

Los suelos ácidos andisólicos inmovilizan irreversiblemente el fósforo mediante fijación masiva con el aluminio activo (Sadeghian, 2016). La ausencia de estos coloides amorfos significa que el fósforo nativo o el aportado orgánicamente no se bloqueará con rigidez extrema, quedando biodisponible a través de vías biológicas tradicionales.

Mitigación de la Toxicidad Aguda: Aunque la acidez intercambiable registra 0.8 meq/100g (compuesta por H^+ y trazas de Al^{3+}) la negatividad del NaF demuestra la ausencia de una reserva latente de aluminio amorfo reactivo capaz de resurgir de forma fitotóxica masiva.

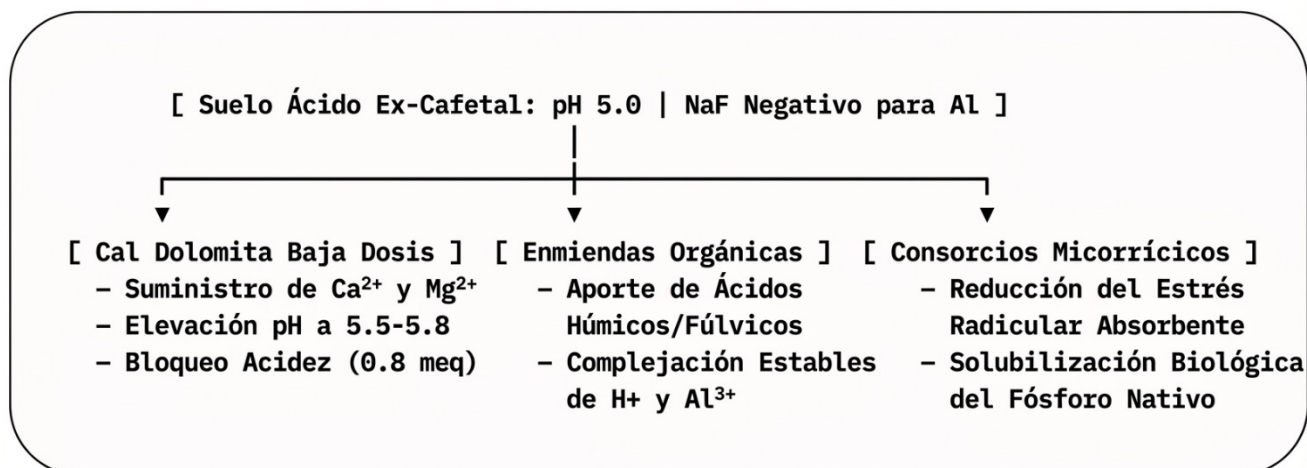
Facilitación Biológica

Las raíces de las especies arbóreas sucesionales y las redes microbianas no enfrentarán las barreras fisiológicas extremas que impone el aluminio soluble, tales como la destrucción celular del ápice radicular o la inhibición de la síntesis de biomasa por estrés oxidativo (Rosas et al., 2025).

Propuesta de Manejo Biogeoquímico para la Restauración Ecológica

Dado que el objetivo central del sitio es catalizar la sucesión vegetal hacia un bosque nativo, el uso de fertilizantes químicos altamente solubles de síntesis industrial queda descartado. La estrategia se fundamenta en un modelo agroecológico de enmiendas de bajo impacto y estimulación biológica (Figura 1).

Figura 1. Esquema integrado de manejo edáfico de bajos insumos para la restauración agroecológica y forestal.



Aplicación Estratégica de Cal Dolomita en Bajas Dosis

Debido a la baja acidez intercambiable (0.8 meq/100g) y la ausencia de geles amorfos de Al, el suelo no requiere de encalados agresivos. La incorporación de dosis elevadas de cal pura provocaría un sobre-encalamiento, induciendo la inmovilización de micronutrientes esenciales por clorosis calcárea y desestabilizando los equilibrios iónicos (Sadeghian, 2016).

Se propone aplicar cal dolomita CaCO_3 en dosis bajas y controladas, estimadas entre 500 y 700 kg/ha, localizada exclusivamente en las zonas de ahoyado o en los núcleos forestales de siembra. Los propósitos de esta enmienda son:

Elevar sutilmente el pH desde 5.0 hasta un rango de 5.5 a 5.8, un umbral óptimo donde cesa la interferencia por acidez y se optimiza la solubilidad general de nutrientes para las especies forestales nativas (Castro & Munevar, 2013).

Neutralizar de forma dirigida los 0.8 meq/100g de acidez activa de cambio.

Suministrar directamente Calcio Ca^{2+} y Magnesio Mg^{2+} , cationes estructurales drásticamente agotados durante los ciclos históricos de cosecha de café y por la lixiviación pluvial (Sadeghian, 2016).

Incorporación de Enmiendas Orgánicas Estabilizadas

Se prescribe el uso de compost maduro o vermicompost de origen local a razón de 1 a 2 kg por hoyo de plantación, excluyendo estrictamente estiércoles frescos. Las fracciones orgánicas estables ricas en ácidos húmicos y fúlvicos actúan como amortiguadores químicos (*buffers*) de alta eficiencia. Estos compuestos macromoleculares complejan las trazas de acidez residual mediante interacciones de quelatación superficial, incrementan de manera sostenida la CICE en suelos de carga variable y proveen un suministro gradual de nitrógeno y azufre a través de procesos de mineralización biológica (Sadeghian, 2016).

Inoculación con Hongos Micorrícicos Arbusculares (HMA)

Como eje biológico de la propuesta, se implementará la inoculación de consorcios nativos de HMA directamente en el sistema radicular de las plántulas forestales durante la fase de vivero o al momento del trasplante en campo. La simbiosis micorrícica expande exponencialmente el área superficial del sistema radicular a través de la red de hifas externas (Rosas et al., 2025).

Bajo condiciones de acidez moderada, los HMA secretan fosfatasas ácidas y ácidos orgánicos de bajo peso molecular que liberan de manera eficiente el fósforo ocluido en las fracciones minerales del suelo, protegen mecánicamente las membranas de las raíces contra cualquier vestigio de estrés abiótico y mejoran sustancialmente la agregación física y la retención de agua en suelos degradados por monocultivos (Rosas et al., 2025).

Conclusiones

El suelo analizado en El Líbano, Tolima, refleja el impacto químico de la caficultura histórica a libre exposición solar, mostrando un pH H_2O de 5.0 y un Delta de pH negativo ($\Delta pH = -0.8$) que certifica una matriz edáfica dominada por coloides de carga variable con una reducida capacidad de intercambio catiónico efectiva.

La respuesta negativa a la prueba de Fluoruro de Sodio (NaF) demuestra la ausencia de minerales amorfos andisólicos y de aluminio activo altamente reactivo en el complejo de cambio; esta particularidad disminuye considerablemente el riesgo de fijación irreversible de fósforo y constata que la acidez intercambiable registrada (0.8 meq/100g) es de manejo moderado.

La transición ecológica del antiguo cafetal no requiere intervenciones químicas severas; un plan integrado que conjugue dosis bajas de cal dolomita para aportar Ca y Mg, la adición de enmiendas orgánicas estables y la inoculación de micorrizas arbusculares es suficiente para estabilizar el pH en niveles óptimos y dinamizar la regeneración del bosque nativo de forma sostenible y de bajos insumos.

Bibliografía

- Castro, H., y Munevar, Ó. (2013). Mejoramiento químico de suelos ácidos mediante el uso combinado de materiales encalantes. *Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica*, 16(2), 409-416.
- Lizcano Toledo, R., Olivera Viciado, D., Saavedra Mora, D., Machado Cuellar, L., Valencia, E., Moreno Pérez, M. F., & Flórez, M. F. (2017). *Muestreo de suelos, técnicas de laboratorio e interpretación de análisis de suelos*.
- Rosas-Patiño, G., Ávila-Pedraza, E., y Sánchez-Castillo, V. (2025). La acidez del suelo limita la producción agrícola: una revisión enfocada en la Amazonia colombiana.

Revista de Investigación Agraria y Ambiental, 16(1), 185 - 211.

<https://doi.org/10.22490/21456453.7857>

Sadeghian Khalajabadi, S. (2016). La acidez del suelo, una limitante común para la producción de café. *Cenicafé. Avances Técnicos*, (466), 1-8.

<https://doi.org/10.38141/10779/0466>

Zapata Hernández, R. D. (2002). *Química de la acidez del suelo*. Universidad Nacional de Colombia (Sede Medellín).

Zheng, L., y Ren, K. (2026). Nutrient dynamics and controls in alkaline and acid soils of a subtropical karst region, Southwest China. *Catena*, 269, 110097.

<https://doi.org/10.1016/j.catena.2026.110097>