



Fecha de recibido: 27-03-2024

Fecha de aceptado: 05-09-2024

DOI: 10.22490/21456453.7857

LA ACIDEZ DEL SUELO LIMITA LA PRODUCCIÓN AGRÍCOLA: UNA REVISIÓN ENFOCADA EN LA AMAZONIA COLOMBIANA

SOIL ACIDITY LIMITS AGRICULTURAL PRODUCTION: A REVIEW FOCUSED ON THE COLOMBIAN AMAZON

Gelber Rosas-Patiño¹

Edgar Álvaro Ávila-Pedraza²

Verenice Sánchez-Castillo³

¹ Doctor en Ciencias Agrarias, profesor de la Facultad de Ingeniería, Universidad de la Amazonia, Florencia, Caquetá, Colombia.
g.rosas@udla.edu.co

² Doctor en Ciencias Agrarias, profesor de la Facultad de Ingeniería agronómica, Universidad del Tolima, Ibagué, Tolima, Colombia.
eaavila@ut.edu.co

³ Doctora en Antropología, profesora de la Facultad de Ingeniería, Universidad de la Amazonia, Florencia, Caquetá, Colombia.
ve.sanchez@udla.edu.co

Citación: 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>

RESUMEN

Contextualización: los suelos tropicales ácidos se caracterizan por presentar bajo pH, altas concentraciones de aluminio y baja disponibilidad de nutrientes, lo que limita el desarrollo de la raíz y la producción de los cultivos. Los suelos de la Amazonia colombiana, en donde predominan oxisoles y ultisoles, hacen parte de este grupo de suelos ácidos y de baja fertilidad natural.

Vacío de conocimiento: el comportamiento de las plantas que crecen en suelos ácidos ha ocupado el interés de investigadores en todo el mundo, pero es escasa la información actualizada y de libre acceso que permita entender con suficiencia la naturaleza de estos suelos, así como las estrategias morfológicas, fisiológicas y bioquímicas de adaptación de los cultivos de importancia agrícola desarrollados en los suelos ácidos de la Amazonia colombiana.

Propósito: presentar una síntesis de los últimos avances científicos relacionados con los suelos ácidos, la relación de la acidez con la disponibilidad de nutrientes y los efectos tóxicos del aluminio, así como los meca-

nismos de adaptación desarrollados por las plantas. En esta revisión también se aborda de manera especial los efectos de la acidez del suelo en ocho cultivos de importancia agrícola para los productores en la Amazonia colombiana.

Metodología: se realizó una búsqueda de artículos de libre acceso publicados en cuatro bases de datos de la Web entre el 2020 y el 2023, sobre las formas del aluminio en el suelo, su relación con la disponibilidad de nutrientes, los efectos tóxicos, los mecanismos de tolerancia de la planta y algunas prácticas de manejo de suelos ácidos.

Resultados y conclusiones: este estudio aporta elementos importantes que ayudan a mejorar la comprensión de los suelos ácidos y plantea escenarios futuros para orientar la gestión del conocimiento, en relación con el manejo de los suelos ácidos y los cultivos agrícolas en la Amazonia colombiana.

Palabras clave: cultivos tolerantes, disponibilidad de nutrientes, encalado, pH del suelo, toxicidad por aluminio

ABSTRACT

Contextualization: acidic tropical soils are characterized by low pH, high concentrations of aluminum and low nutrient availability, which limits root development and crop production. The soils of the Colombian Amazon, where Oxisols and Ultisols predominate, are part of this group of acidic soils with low natural fertility.

Knowledge gap: the behavior of plants that grow in acidic soils has occupied the interest of researchers around the world, but there is a lack of updated and freely accessible information that allows us to sufficiently understand the nature of these soils, as well as the morphological, physiological, and biochemical adaptation strategies of crops of agricultural importance developed in the acidic soils of the Colombian Amazon.

Purpose: present a synthesis of the latest scientific advances related to acidic soils, the relationship of acidity with nutrient availability and the toxic effects of aluminum, as

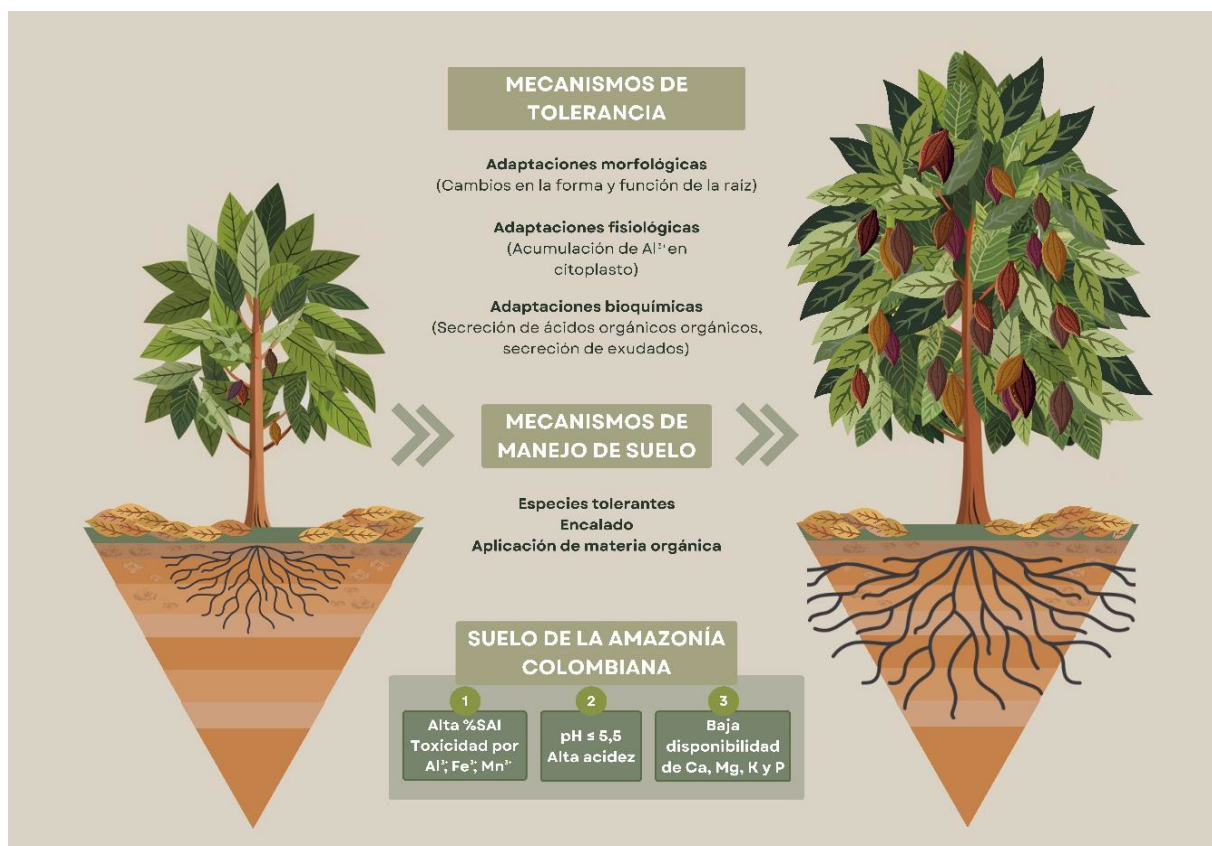
well as the adaptation mechanisms developed by plants. This review also addresses in a special way the effects of soil acidity on eight crops of agricultural importance for producers in the Colombian Amazon.

Methodology: a search was carried out for free access articles published in four Web databases between 2020 and 2023, on the forms of aluminum in the soil, its relationship with nutrient availability, toxic effects, tolerance mechanisms of the plant and some acid soil management practices.

Results and conclusions: this study provides important elements that help improve the understanding of acidic soils and proposes future scenarios to guide knowledge management on the management of acidic soils and agricultural crops in the Colombian Amazon.

Keywords: aluminum toxicity, liming, nutrient availability, soil pH, tolerant crops

RESUMEN GRÁFICO



Fuente: autores.

1 INTRODUCCIÓN

En las regiones de clima tropical predominan los oxisoles y ultisoles (ferralsoles y Acrisoles en sistema de clasificación de suelos de la FAO), suelos ácidos dominados por minerales ricos en sílice, hierro y aluminio (Rosas *et al.*, 2017; Yan *et al.*, 2023). Estos suelos presentan alta evolución y baja fertilidad natural, producto de variados procesos pedogenéticos como la ferralitización

y la argiluvación, que ocasionan la pérdida de bases y concentración de óxidos de hierro y aluminio (Chiapini *et al.*, 2023).

Los cultivos que se establecen en estos suelos ácidos pueden experimentar estrés abiótico, deficiencias de nutrientes y toxicidad por aluminio (Li *et al.*, 2023) debido a que, en condiciones de pH bajo, el aluminio

se solubiliza e inhibe el crecimiento y desarrollo de las raíces de las plantas (Kundu y Ganesa, 2023). Los altos niveles de este metal intercambiable y soluble también promueven la fijación de fósforo en los coloides del suelo y ralentizan la nitrificación y fijación del nitrógeno, lo que genera deficiencias de estos nutrientes y limita la producción agrícola (Li *et al.*, 2023).

Es bien conocido el interés que desde siempre ha tenido la comunidad científica mundial por encontrar estrategias de manejo de estos suelos ácidos, con el propósito de comprender mejor su naturaleza, los procesos edafológicos que desencadenan la toxicidad, así como los principios **morfológicos, fisiológicos y bioquímicos** en que se sustenta la adaptación de las plantas a las condiciones de acidez. El 90% de los suelos de la Amazonia colombiana presentan condiciones de alta acidez (Peña y Cardona, 2010), por lo que desarrollar actividades agrícolas competitivas no resulta fácil cuando se cuenta con suelos con estas situaciones, aún

más, cuando no se conocen las alternativas adecuadas para su manejo. Este es el reto que deben afrontar los técnicos y los productores rurales de la Amazonia colombiana a la hora de establecer sus cultivos, por lo que se hace necesario realizar un registro y análisis de investigaciones recientes de libre acceso con la finalidad de aportar elementos orientadores para enfrentar los desafíos que trae consigo la producción agrícola en suelos ácidos.

Por lo tanto, el objetivo de este artículo es presentar una revisión de las investigaciones recientes publicadas en cuatro bases de datos, open access de la Web, sobre: primero, los suelos ácidos de la Amazonia colombiana y las formas del aluminio en el suelo; segundo, la relación entre la acidez del suelo y la disponibilidad de nutrientes, los efectos tóxicos y los mecanismos de adaptación de las plantas y algunas prácticas de manejo; y tercero, los principales efectos de la acidez del suelo en cultivos considerados de importancia agrícola en la Amazonia colombiana.

2 MATERIALES Y MÉTODOS

Se realizó la búsqueda y selección de artículos científicos y de revisión de acceso abierto publicados entre los años 2020 y 2023, en las bases de ScienceDirect, Scopus, SpringerLink y Google Scholar como también de algunas de otras fuentes, utilizando términos de búsqueda en español e inglés, como: “suelos ácidos Amazonia”, “acidez en cultivos”, “toxicidad de aluminio en la plan-

ta”, “plantas tolerantes al aluminio”, “manejo suelos ácidos”, “cultivos agrícolas en la Amazonia”, así como nombres científicos y comunes de los cultivos agrícolas seleccionados. A pesar de encontrarse amplia información (especialmente en Google Scholar), solo fue posible acceder a los documentos que eran de acceso abierto.

Se seleccionaron los artículos de investigación y revisión más recientes, no duplicados en las otras bases consultadas y afines al tema de interés, entre otros criterios (Figura 1). Los ocho cultivos incluidos en esta revisión corresponden a las principales alternativas productivas que sustentan la economía de los productores agrícolas de la región

amazónica (Agronet, 2023), estos son: pasturas (*Urochloa* sp.), plátano (*Musa* sp), yuca (*Manihot sculenta* Crantz), caucho (*Hevea brasiliensis* W.A.J. M.), cacao (*Theobroma cacao* L.), caña panelera (*Saccharum officinarum* L.), chontaduro (*Bactris gasipaes* Kunth), y piña (*Ananas comosus* L. Merr.).

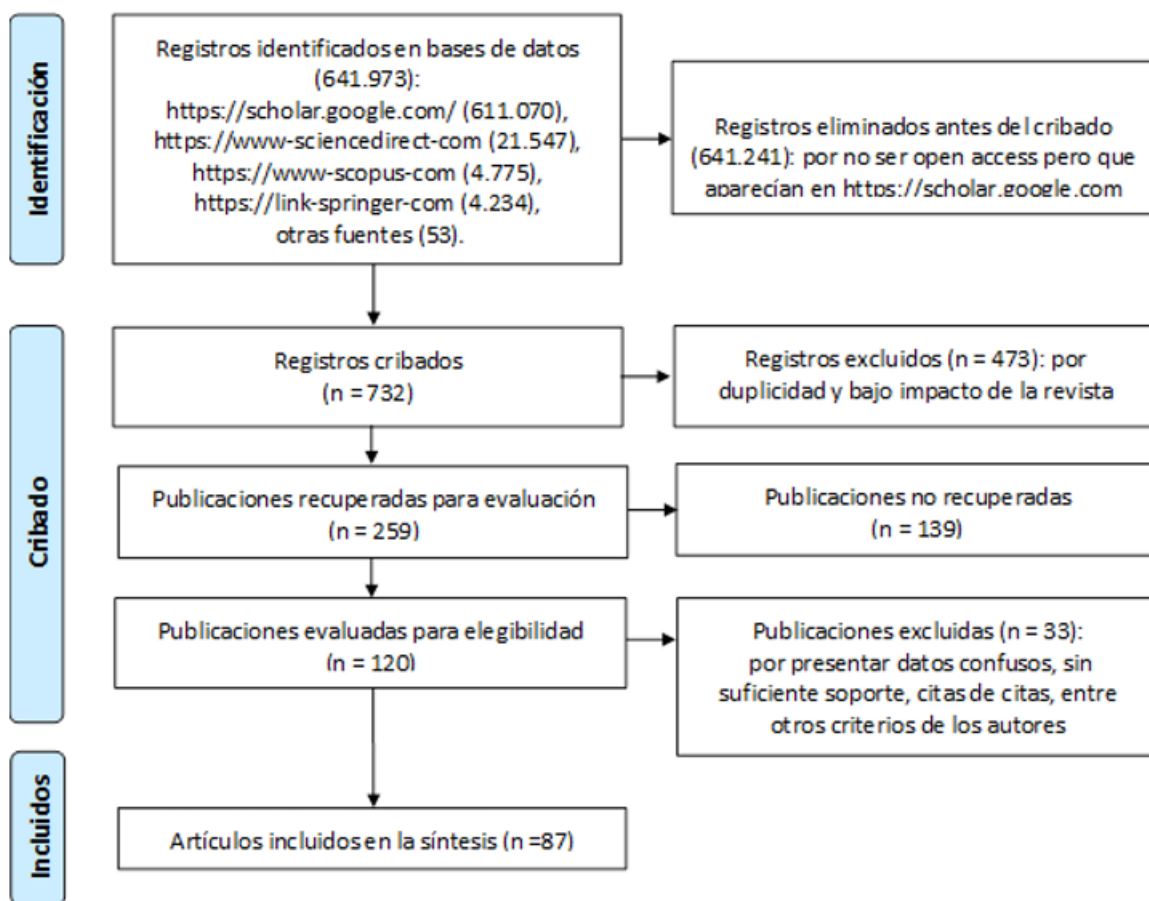


Figura 1. Diagrama de flujo PRISMA 2020 de la revisión

Fuente: adaptado de Page *et al.* (2021).

3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Suelos ácidos en la Amazonia Colombiana

La Amazonia colombiana ocupa una superficie aproximada de 34 millones de hectáreas (Ruiz *et al.*, 2022), está cubierta principalmente por bosque, pasturas y cultivos. Presenta condiciones climáticas propias del trópico húmedo, lo que acelera los procesos de meteorización (Agudelo *et al.*, 2023). Sus suelos ácidos provienen de rocas ígneas y sedimentarias con afinidad metaluminosa y peraluminosa que al intemperizarse producen minerales primarios como cuarzo, biotita, aluminosilicatos, anfíboles, plagioclasas y piroxenos (Rodríguez *et al.*, 2011). Este material inorgánico conforma paisajes de lomerío y altiplanicies con predominio de minerales secundarios (arcillas y minerales amorfos) como caolinitas, goetita, hematita, pirofilita, gibbsita y halloysitas ricas en sílice, hierro y aluminio (Malagón, 2003; Rosas *et al.*, 2017). Estas características pedogenéticas de la fracción fina explican en gran medida el origen de la alta acidez del suelo y la baja disponibilidad de nutrientes para los cultivos. Es decir que la acidez en estos suelos tropicales se presenta de forma natural cuando el Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ y Na^+ se pierden y son remplazados por iones de H^+ y Al^{3+} (Agegnehu *et al.*, 2021).

Muchos minerales del suelo que contienen aluminio se vuelven inestables y se consideran ácidos cuando el $\text{pH} < 5,5$ y el Al^{3+} alcanza niveles tóxicos para los cultivos (Zhu y

Shen, 2023). El aluminio en el suelo se puede encontrar en forma insoluble haciendo parte de la estructura de minerales primarios y minerales secundarios, estas formas se consideran inofensivas para las plantas (Yan *et al.*, 2023), pero en suelos ácidos, el aluminio se encuentra de forma interlaminar, intercambiable, lábil, asociado a la materia orgánica o en forma de aluminosilicato de rango corto (Prietz *et al.*, 2023). Sin embargo, el aluminio soluble (Al^{3+}) es el mayor responsable de la toxicidad para la planta, aunque otras formas como $\text{Al}(\text{OH})^{2+}$, $\text{Al}(\text{OH})_3$, $\text{Al}(\text{OH})_2^+$ y $\text{Al}(\text{OH})_4^-$ pueden generar problemas (Zhu y Shen, 2023).

Relación de la acidez y la disponibilidad de nutrientes

El pH puede presentar efectos diferenciados en la disponibilidad de los nutrientes puesto que las relaciones iónicas en el suelo dependen, entre otros factores, de la forma de cada elemento. Por ejemplo, la reacción ácida hace que disminuya la capacidad de intercambio catiónico y que las bases (Ca^{2+} , Mg^{2+} y K^+) que son muy solubles, se lixivien y decrezca su concentración en la solución del suelo (Alkharabsheh *et al.*, 2021). En suelos con pH de 4,3 y aluminio intercambiable de 3,7 $\text{cmol}(+) \text{ kg}^{-1}$ cultivados con plantas de palma de aceite, la presencia de bases aumentó significativamente cuando el pH se incrementó a 4,7 y el aluminio intercambia-

ble se redujo a 0,7 cmol(+) kg⁻¹ (Husain *et al.*, 2021).

Los aniones también se ven afectados por la acidez del suelo; a pH<5,0, los fosfatos (H₂PO₄⁻, HPO₄²⁻), sulfatos (SO₄²⁻) y molibdatos (MoO₄²⁻) son adsorbidos fuertemente por los óxidos e hidróxidos de aluminio del suelo (Barrow y Hartemink, 2023). En condiciones de acidez, el Al³⁺ reacciona fácilmente con el P, S y Mo y forma compuestos insolubles (Nie *et al.*, 2020), generando deficiencia de estos elementos en la planta.

Con relación al nitrógeno, los contenidos en el suelo pueden no verse afectados significativamente por las variaciones del pH (Rosas *et al.*, 2017; Bekele *et al.*, 2022); incluso, en suelos arcillosos y de bajo pH, los óxidos e hidróxidos de aluminio llegan a unirse a compuestos orgánicos y contribuyen a la estabilización de la materia orgánica (Zacháry *et al.*, 2023), fuente importante de nitrógeno en suelos amazónicos (Bozzi *et al.*, 2023). Sin embargo, cuando el aluminio se hace soluble afecta negativamente a los microorganismos que intervienen en el ciclo del nitrógeno. En este sentido, Bossolani *et al.*, (2020) reportaron que la neutralización de la acidez del suelo aumenta las arqueas y bacterias que

intervienen en el ciclo biogeoquímico del nitrógeno. Además, las elevadas concentraciones de aluminio y los bajos niveles de fósforo (condiciones comunes en suelos con pH < 5,0), limitan el crecimiento y la nodulación de bacterias simbióticas fijadoras de nitrógeno en las leguminosas (Bakari *et al.*, 2020). En consecuencia, la toxicidad del aluminio puede tener serias implicaciones en la disponibilidad del nitrógeno en cultivos establecidos en ultisoles y oxisoles.

Estos suelos ácidos de la Amazonia también presentan altas concentraciones de Zn, Cu, Fe y Mn (Gonçalves *et al.*, 2022) que, aunque resultan esenciales para la planta, a pH bajo son altamente solubles y pueden ocasionar deficiencias de otros elementos (como Mg y Si) al igual que toxicidad en cultivos sensibles (Rai *et al.*, 2021; Armatmon-tree *et al.*, 2023).

Lo anteriormente expuesto manifiesta la clara relación entre las condiciones de acidez y la disponibilidad de nutrientes en el suelo. La Tabla 1 registra variaciones significativas en la disponibilidad de nutrientes cuando, a partir del encalado, se incrementa el pH (de 4,36 a 5,91) y se disminuye el aluminio intercambiable en suelos ácidos.

Tabla 1.

Relación entre pH y aluminio y la disponibilidad de nutrientes en suelos ácidos del trópico

Nutriente	Acidez del suelo		Fuente
	Alta	Baja	
Nitrógeno (%)	0,15	0,19	Ejigu <i>et al.</i> , 2023*
Fósforo (mg kg ⁻¹)	7,26	10,45	
Potasio (cmol(+) kg ⁻¹)	0,17	0,28	

Calcio (cmol(+) kg ⁻¹)	0,65	4,49	Rosas <i>et al.</i> , 2017**
Magnesio (cmol(+) kg ⁻¹)	0,14	2,99	
Cobre (mg kg ⁻¹)	1,69	0,92	
Hierro (mg kg ⁻¹)	102,84	32,52	
Manganeso (mg kg ⁻¹)	19,10	15,57	
Molibdeno (mg kg ⁻¹)	0,65	1,70	Rosado <i>et al.</i> , 2021***

*cambio de pH de 4,82 a 5,67 y aluminio intercambiable de 1,44 a 0,45 cmol(+) kg⁻¹

** cambio de pH de 4,36 a 5,91 y aluminio intercambiable de 1,45 a 0,00 cmol(+) kg⁻¹

***cambio de pH de 6,3 a 4,92

Fuente: autores.

Efectos tóxicos del aluminio en morfología y fisiología de las plantas

Los efectos tóxicos del aluminio y su impacto en las plantas dependen en gran medida de la concentración, el tiempo de exposición, las especies de plantas, la edad de desarrollo y las condiciones de crecimiento (Ofoe *et al.*, 2023), esta toxicidad hace que las plantas disminuyan el contenido de clorofila, longitud de brotes, longitud de las raíces y presenten daños estructurales en el tejido foliar (Lin *et al.*, 2023), ocasionado por la generación de Especies Reactivas de Oxígeno (ROS, por sus siglas en inglés). Al respecto, Chunquan *et al.*, (2021) encontraron que 50 µmol L⁻¹ de aluminio indujeron la generación de ROS que inhibieron la germinación, el crecimiento de las raíces y la muerte de las células ubicadas el ápice de las raíces. Incluso niveles bajos de aluminio (0,4 µmol L⁻¹) pueden afectar el crecimiento de raíz y tallo, el contenido de clorofila, azúcares, almidones, los niveles de potasio,

calcio, magnesio y fósforo (Che *et al.*, 2023). Sin embargo, es importante considerar que las plantas responden de manera diferenciada ante el estrés abiótico originado por las condiciones de acidez (Rosas *et al.*, 2019).

Mecanismos de adaptación y tolerancia de las plantas a la toxicidad por aluminio

Las plantas, ante el estrés por la toxicidad ocasionada por Al³⁺, generan mecanismos de tolerancia basados en la exclusión (impedir que el aluminio entre en las raíces) y la desintoxicación (contrarrestar el aluminio tóxico absorbido por las raíces) (Yan *et al.*, 2023). Cuando este aluminio no es retenido en la raíz, se transporta a los demás órganos de la planta en el siguiente orden: hojas maduras > raíces > ramas > hojas jóvenes (Fung *et al.*, 2009). Las plantas desarrollan mecanismos de adaptación a las altas concentraciones de aluminio en suelos ácidos, basadas en cambios morfológicos, fisiológicos y bioquímicos.

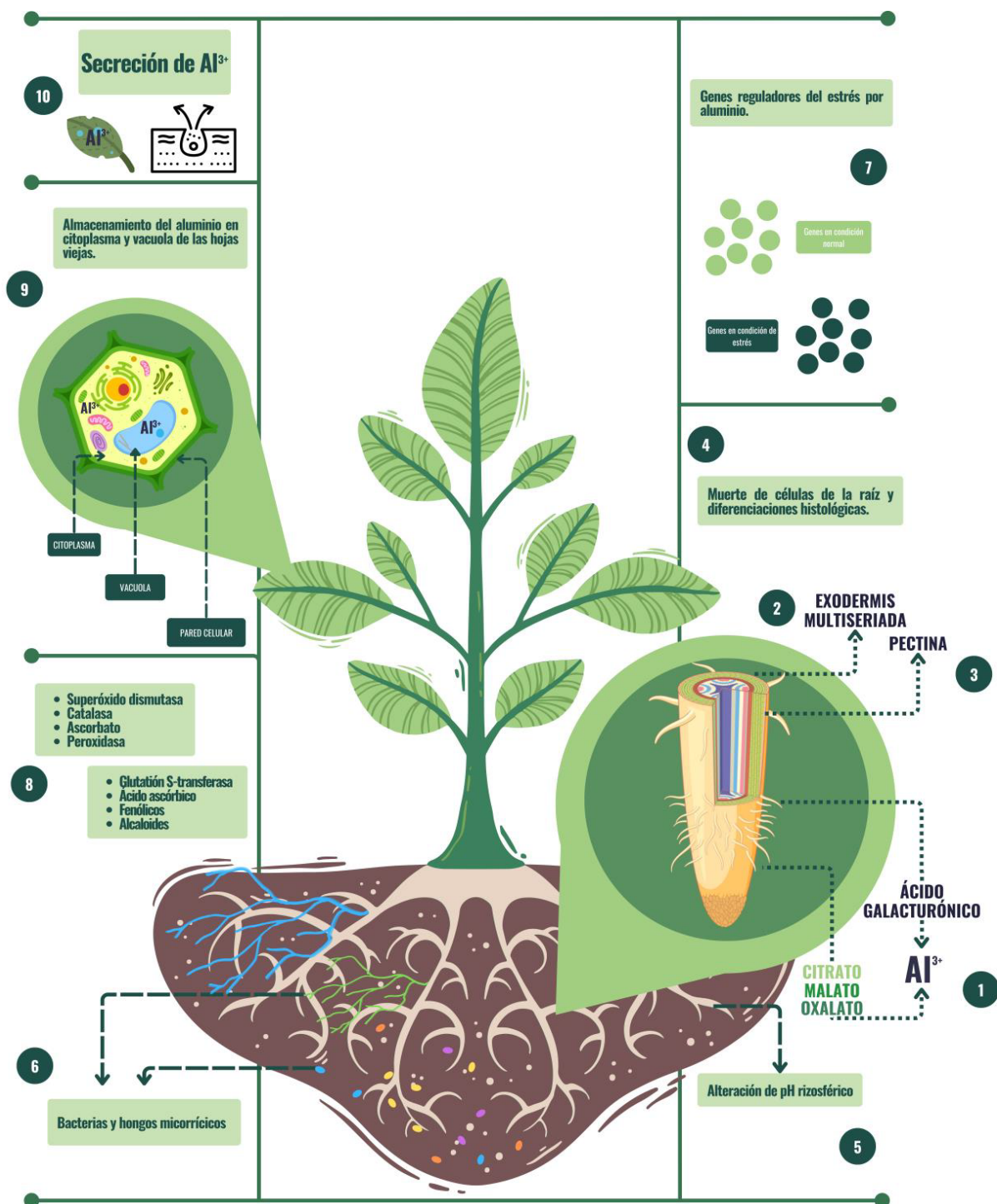


Figura 2. Principales estrategias de adaptación de las plantas a las condiciones de acidez del suelo

Fuente: autores.

Las plantas desarrollan mecanismos de adaptación a las altas concentraciones de aluminio en suelos ácidos, basadas en cambios morfológicos, fisiológicos y bioquímicos (Figura 2). Una estrategia común consiste en que liberan por la raíz ácidos orgánicos de bajo (citrato, oxalato y malato) y alto (ácido galacturónico) peso molecular para formar con el aluminio complejos no tóxicos (Kundu y Ganesan, 2020), acumulando pectina para desarrollar una exodermis multiseriada con celulosa y hemicelulosa que actúa como una barrera para atrapar al aluminio en la raíz (Jiang *et al.*, 2022; Li *et al.*, 2022). Estas plantas también regulan la muerte programada de las células de la raíz y desarrollan diferenciaciones histológicas de los pelos radicales para engrosar la endodermis con el fin de retener al aluminio (Yao *et al.*, 2020; Pandey *et al.*, 2022).

Para reducir el efecto de la generación de ROS por la toxicidad, sobreexpresan genes reguladores de estrés (Gallo-Franco *et al.*, 2023), activan enzimas antioxidantes como superóxido dismutasa, catalasa, ascorbato peroxidasa, glutatión S-transferasa, ácido ascórbico, fenólicos y alcaloides (Ranjan *et al.*, 2021), almacenan el aluminio que ingresa a la planta en el citoplasma y la vacuola de las hojas viejas (Zhu y Shen, 2023) y secretan el aluminio por los tricomas de la hoja en forma de exudados (Ofoe *et al.*, 2023). Ya en la rizosfera, estas plantas modifican el pH rizosférico mediante los exudados de la raíz para disminuir la concentración de aluminio (Rahman y Upadhyaya, 2021) y potencian interacciones bióticas con bacterias y hongos micorrízicos para mejorar la eficiencia en la toma de nutrientes (Pandey *et al.*, 2022).

Mecanismos de manejo de la acidez en suelos de uso agrícola

El manejo de la acidez del suelo es una práctica de uso común que se realiza con el propósito de elevar el pH (a valores cercanos a 5,5 donde el aluminio deja de ser soluble), reducir la acidez intercambiable ($\text{Al}^{3+} + \text{H}^{+}$) mediante la formación de complejos insolubles de $\text{Al}(\text{OH})_3$, mejorar la capacidad de intercambio catiónico del suelo (CIC) y aumentar la disponibilidad de nutrientes, especialmente Ca^{2+} , Mg^{2+} y K^{+} (Rosas *et al.*, 2017; Teixeira *et al.*, 2020; Ejigu *et al.*, 2023). Existen diferentes alternativas a las que se puede recurrir para controlar la acidez de los suelos agrícolas. La más utilizada es tal vez el encalado, el cual consiste en la aplicación de material fino ($< 0,25$ micras) de cal agrícola (CaCO_3), cal viva (CaO), cal hidratada ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) o cal dolomita ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$).

En muchas ocasiones la determinación del requerimiento de cal (RC) es basado exclusivamente en el pH y el aluminio intercambiable del suelo (Rosas *et al.*, 2017), pero este método puede conllevar a que se subestime el RC por hectárea o incluso que se sobreestime el RC, lo que genera deficiencias de Fe, B, Mn, Zn y Cu, liberación excesiva de CO_2 y baja rentabilidad agrícola (Aramburu *et al.*, 2023). El RC para cada suelo puede variar dependiendo de: primero, las condiciones edafológicas como la textura, el contenido de materia orgánica, el poder tampón y la profundidad del encalado (Ruehlmann *et al.*, 2021); segundo, las características (porcentaje de pureza y poder de neutralización) de

la cal a utilizar (Rosas *et al.*, 2017); tercero, la forma de aplicación (superficial o incorporada al suelo con maquinaria), cuando la cal se incorpora se requiere menos dosis y los efectos perduran durante más tiempo (de Campos *et al.*, 2022); y cuarto, la tolerancia del cultivo a la acidez del suelo (Aramburu *et al.*, 2023). Cuando las dosis de cal son adecuadas el proceso de reacidificación es lento, por lo que no es necesario adicionar nuevamente cal durante mucho tiempo, el efecto puede incluso durar más de cuatro décadas (Tiecher *et al.*, 2021).

Pero en ocasiones la cal aplicada en la superficie puede resultar insuficiente para corregir la acidez del subsuelo por lo que el yeso agrícola (CaSO_4) resulta una excelente opción para mejorar el movimiento de la cal en el subsuelo (Lauricella *et al.*, 2021); además, este reduce la fitotoxicidad del aluminio puesto que el sulfato de aluminio soluble (AlSO_4^+) e hidróxidos de aluminio ($\text{Al}(\text{OH})_3$) que se generan en la reacción son inocuos para las plantas (Anderson *et al.*, 2020). Cerda *et al.*, (2022), encontraron que enmiendas con cal dolomítica y yeso agrícola resultaron eficaces para regular el aluminio soluble (de 1,33 a 0,56 $\text{cmol}(+) \text{kg}^{-1}$) e incrementar el pH de 4,3 a 4,9.

El uso de materia orgánica constituye otra práctica importante para regular los efectos de la acidez, aunque en su mineralización se producen ácidos débiles que ocasionan una leve disminución en el pH del suelo (Pavlú *et al.*, 2021), sin embargo, debido a su capacidad complejante se reduce la concentración de aluminio en la solución del suelo (Mbanjwa *et al.*, 2023). Por ello, la incorporación

de materiales orgánicos como el biochar disminuyen la acidez del suelo (Ndiate *et al.*, 2022).

Los subproductos industriales, especialmente los residuos de calderas y escorias, también son utilizados para controlar la acidez de los suelos, sus condiciones alcalinas $\text{pH} > 11$ resultan efectivas a la hora de incrementar el pH del suelo, sin embargo, su uso debe ser estrictamente regulado puesto que algunos pueden contener elementos contaminantes como Cd, Pb y Ar (Hadas *et al.*, 2021).

Todas estas alternativas de enmiendas pueden resultar útiles a la hora de manejar los problemas ocasionados por la acidez del suelo, pero es preciso encontrar siempre la opción de mayor viabilidad agroecológica, económica, social y ambiental.

Efecto de la acidez en cultivos de importancia agrícola en la Amazonia colombiana

A pesar de las dificultades que representa constituir proyectos agropecuarios en suelos ácidos, los productores rurales de la región amazónica en Colombia han establecido algunos cultivos que no solo son la base de su subsistencia alimentaria, sino que sustentan en gran medida la economía local. Sin embargo, y aunque algunas variedades pueden presentar adaptación a las condiciones de acidez de los suelos, los rendimientos de producción suelen estar muy por debajo del potencial genético expresado en condiciones de baja acidez (Deenik *et al.*, 2000; Rosas

et al., 2021; Delgado *et al.*, 2023; Yang *et al.*, 2022; Ribeiro *et al.*, 2021).

Por esta razón, se realiza una síntesis de investigaciones de libre acceso que dan cuenta del comportamiento en condiciones de acidez de los principales cultivos agrícolas en la Amazonia colombiana (Agronet, 2023), esperando que no solo sea de utilidad a la hora de

establecer y manejar estos cultivos, sino también resaltar la necesidad de que las instituciones que tienen injerencia en el sector agrario local mejoren la gestión de conocimiento relacionado con el uso y manejo de los suelos ácidos para que los productores del campo logren ser más competitivos, contando con una mayor sostenibilidad (Tabla 2).

Tabla 2.

Efecto de la acidez del suelo en principales cultivos de la Amazonia colombiana

Cultivo	pH del suelo		Nivel Crítico de aluminio en el suelo	Tipo de afectación en la planta	Referencia
	Crítico	Óptimo			
<i>Brachiaria</i> spp	< 4,5	4,9	1,33 mmol L ⁻¹	Inhibe desarrollo de raíz	Olivera <i>et al.</i> , (2007); Ferreira <i>et al.</i> , (2020); Furlan <i>et al.</i> , (2020)
Plátano	< 4,7	5,5	78,5 μmol L ⁻¹	Disminuye la absorción de agua y nutrientes	Turner <i>et al.</i> , (1989); Delgado <i>et al.</i> , (2023); Rufyikiri <i>et al.</i> , (2001)
Yuca	< 4,8	5,5	100 μmol L ⁻¹	Reduce el peso de raíz	Anikwe <i>et al.</i> , (2016); Punpom <i>et al.</i> , (2022)
Caucho	< 4,4	5,5	100 μmol L ⁻¹	Limita crecimiento y producción	Ambily, (2022); Yang <i>et al.</i> , (2022)
Cacao	<4,3	5,5	19% de saturación	Bajo uso eficiente de nutrientes, bajo desarrollo y producción	Baligar y Fageria, (2005); Rosas <i>et al.</i> , (2021)
Caña panelera	< 5,5	5,5	60% de saturación	Restringe el desarrollo de raíz y la absorción de nutrientes y agua	Carreño y Chaparro, (2013)
Chontaduro	< 4,1	5,5	4,4 cmol L ⁻¹	Baja absorción de nutrientes y producción	Deenik <i>et al.</i> , (2000); Bovi <i>et al.</i> , (2004)
Piña	< 4,5	5,5	1,0 cmol(+) kg ⁻¹	Clorosis en hojas jóvenes y bajo desarrollo de raíz	Betancourt <i>et al.</i> , (2005)

Fuente: autores.

Pasturas de *Brachiaria* (*Urochloa* sp)

Es de amplio conocimiento la capacidad de adaptación de las gramíneas del género *Urochloa* sp. (identificadas por los productores en la región como *Brachiaria*) a condiciones de acidez del suelo (Olivera *et al.*, 2007), estas especies pueden desarrollarse con relativo éxito en suelos de bajo pH (Cor-te *et al.*, 2020; Villegas *et al.*, 2020). Sin embargo, suelos con pH bajo y presencia de aluminio soluble producen en *U. decumbens*, *U. marandu* y *U. brizantha* cambios fisiológicos y morfológicos como la desorganización del sistema vascular, el colapso de las células corticales y la ausencia de pelos radiculares en la punta de la raíz (Ferreira *et al.*, 2020; Furlan *et al.*, 2020). Existen variedades de *Urochloa* sp, como *U. mulato II* y *U. humidicola*, que presentan mejor tolerancia a la acidez del suelo (Villegas *et al.*, 2023), lo que genera mayores rendimientos de producción en los sistemas ganaderos de la Amazonia.

Plátano (*Musa* spp)

El cultivo de plátano presenta amplia tolerancia al pH del suelo y alcanza altos rendimientos en el rango de 4,7-8,0 pero prefiere suelos con pH neutro (Turner *et al.*, 1989). En condiciones de acidez del suelo, el peso del racimo y el número de manos y dedos se ven afectados negativamente (Delgado *et al.*, 2023). Flarian *et al.* (2023) reportaron que el número de chupones, hojas y dedos por racimo, al igual que el peso y cantidad de dedos del racimo, se correlacionaron positivamente con el pH del suelo.

El Al^{3+} soluble reduce la producción de biomasa en un 65% y la absorción de nutrientes entre 56 y 89%, lo que reduce la producción de la planta (Sancho y Molina, 2016) y afecta negativamente la absorción de agua (hasta en un 50%). Cuando en suelos ácidos se alcanzan incrementos de pH de 3 a 5, la toxicidad de aluminio se reduce significativamente, se incrementa la absorción de nutrientes, mejorando así el desarrollo del plátano (Sancho y Molina, 2016).

Yuca (*Manihot sculenta* Crantz)

La yuca es un cultivo tolerante a los ácidos (Gregory y Wojciechowski, 2020), de hecho, la presencia de aluminio en bajas concentraciones ($50 \mu\text{mol L}^{-1}$) y pH cercanos a 5,5, estimulan la liberación de protones de H^+ los cuales aumentan la solubilidad y absorción de Fe por la planta. Guerra y Chacón, (2012) en una investigación realizada en oxisoles de Colombia, encontraron que la yuca posee alta micotrofia (especialmente con *Glomus* sp) lo que, al parecer, facilita la retención del aluminio en raíz y permite translocar menos cantidad del elemento al tejido foliar (Guerra y Chacón, 2012). A pesar de ello, Anikwe *et al.* (2016) encontraron que aplicaciones de 5 Mg ha^{-1} de CaCO_3 y $2,5$ de (CaSO_4) en un ultisol de Nigeria, permitieron mejorar el pH del suelo (de 4,8 a 5,9) favoreciendo al aumento del número de hojas, el índice de área foliar y los rendimientos de cosecha, al pasar de 6 a $9,3 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$.

Caucho (*Hevea brasiliensis* (Willd. ex A. Juss.) Müll.Arg.)

Aunque el caucho se adapta a los suelos ácidos, en suelos de pH bajo se reduce la extracción de nutrientes (particularmente el fósforo) y se inhibe el crecimiento y engrosamiento del tallo (Diniz *et al.*, 2022). Ambily, (2022) reporta que el caucho prefiere un pH rizosférico neutro o cercanos a 5,5, en donde el efecto de la acidez es tolerable y la disponibilidad de nutrientes es mayor. A pesar de la alta tolerancia de *H. brasiliensis* al aluminio en el suelo, concentraciones elevadas de este pueden afectar el crecimiento del árbol y disminuir los rendimientos (An *et al.*, 2018; Yang *et al.*, 2022). El árbol de caucho ha desarrollado estrategias de adaptación (probablemente mediante exudaciones de la raíz) a las condiciones de acidez enfocadas a incrementar el pH rizosférico de 4,4 a 5,1 y disminuirlo de 7,4 a 6,2 (Ambily, 2022). Sin embargo, el encalado y las enmiendas orgánicas siempre son una alternativa para mejorar la calidad del suelo y la productividad de las plantaciones de caucho en suelos de alta acidez.

Cacao (*Theobroma cacao* L.)

El árbol de cacao tiene su origen en la Amazonia, pero los cultivos establecidos en la región presentan bajo rendimiento debido a que, la alta acidez y escasa fertilidad del suelo limitan el uso eficiente de nutrientes (Rosas *et al.*, 2021), por lo que los cacaocultores e investigadores de la zona han optado por realizar prácticas de manejo de la acidez del suelo. En otras publicaciones sobre efi-

ciencia de nutrientes en cacao, estos autores hallaron que la acidez del suelo restringe el uso eficiente de N-P-K en clones como ICS-1, ICS-39, TSH-565 y CCN-5 (en menor intensidad), por lo que es necesario encalar y fertilizar teniendo en cuenta las preferencias edáficas para cada clon (Rosas *et al.*, 2019). Sin embargo, cuando se incrementa el pH del suelo a 5,5 mediante el encalado, se aumenta la eficiencia en la absorción de nutrientes y se alcanzan mayores producciones (Rosas *et al.*, 2021).

Caña panelera (*Saccharum officinarum* L.)

El aluminio en suelos ácidos es un factor limitante para el crecimiento de la caña. Los síntomas iniciales de la toxicidad al aluminio son la inhibición del crecimiento radicular, cambios en el desarrollo de los pelos radiculares y clorosis, y quemazón en las hojas superiores (Ribeiro *et al.*, 2021). La aplicación de enmiendas cal es una alternativa vigente para regular los efectos de la acidez en los cultivos de caña.

De Campos *et al.*, (2022), encontraron que la combinación de sistemas de labranza profunda del suelo con la aplicación de cal, es una estrategia potencial para controlar hasta por 42 meses, después del encalado, la acidez del suelo y aumentar la concentración de sacarosa, los rendimientos de tallo y la producción de caña de azúcar. Pero debido a los altos costos del encalado, los ingenios están optando por desarrollar variedades modificadas genéticamente (transgénicas), las cuales eliminan el aluminio del ápice de la raíz a través de la exudación radicular de

malato y citrato (Ribeiro *et al.*, 2021). Para esta misma táctica, Rosa *et al.* (2020) identificaron y aislaron los genes de variedades de caña tolerantes al estrés de aluminio que inducen la desintoxicación eficiente, la formación de raíces laterales y la activación de enzimas redox.

El suministro de sílice también ayuda a mitigar el estrés abiótico ocasionado por el aluminio en la caña; Junior *et al.* (2023) reportaron que 2 mmol L⁻¹ de Si ayudaron a promover cambios en la morfoanatomía de las raíces para atenuar la toxicidad del aluminio en las plántulas de caña de azúcar al limitar la absorción y el transporte de Al³⁺ a los tejidos.

Mejorar la actividad microbiana en los suelos también contribuye a incrementar la tolerancia de *S. officinarum* al estrés por aluminio. Labanca *et al.* (2020) inocularon plántulas con bacterias promotoras del crecimiento en un suelo con 37% de saturación de Al y pH 4,0, las bacterias aumentaron la biomasa de raíces y brotes, así como los contenidos Ca y B como mecanismo para aliviar el estrés.

Chontaduro (*Bactris gasipaes* Kunth)

El chontaduro es una especie del suroeste de la Amazonia (da Silva y Clement, 2005) de la cual no se encontraron reportes científicos que den cuenta de posibles restricciones o toxicidad ocasionada por el aluminio del suelo. De hecho, Ares *et al.* (2002) manifiestan que *B. gasipaes* se adapta perfectamente a suelos ácidos y poco fértiles, aunque la nu-

trición es necesaria para alcanzar y sostener la producción comercial del cultivo. Deenik *et al.*, (2000) reportaron que el chontaduro puede cultivarse en suelos extremadamente ácidos con saturaciones de aluminio hasta del 71 %, sin embargo, los valores óptimos para su desarrollo corresponden a pH neutros con menos de 1 cmol L⁻¹ de aluminio en solución. Bovi *et al.* (2004) evaluaron los efectos del encalado en el crecimiento y producción de palmito de *B. gasipaes* cultivada en un Ultic Haplorthox con pH de 4,1 y saturación de bases del 26 %, donde encontraron que la mayor absorción de nutrientes al igual que el rendimiento máximo se alcanzaron con 4,3 Mg ha⁻¹ de cal dolomita, cuando el pH se elevó a 4,5 y la saturación de bases a 51,4 %. Sin embargo, se evidenció una disminución significativa en la toma de N, P y micronutrientes, así como en el desarrollo y rendimiento, cuando se aplicaron grandes cantidades de cal (8,7 y 14,6 Mg ha⁻¹) y el pH fue mayor a 4,8. No se encontraron reportes sobre efectos de la acidez del suelo en la producción del fruto de chontaduro.

Piña (*Ananas comosus* L. Merr.)

La piña es un cultivo tropical tolerante a las condiciones de acidez de los suelos, incluso, la piña cayena es considerada una variedad altamente resistente a la presencia de aluminio en solución e incrementa la longitud de raíz y la absorción de Ca, Mg y K (lo cual sería un posible mecanismo para reducir la toxicidad) cuando se somete a 200 μmol L⁻¹ de AlCl₃ (Lin, 2010). Sin embargo, algunos cultivares como Tainung No.17 que son susceptibles a la toxicidad por aluminio,

presentan clorosis en hojas jóvenes y las raíces son cortas y gruesas (Lin, 2010). Al respecto, Cahyono *et al.* (2019) demostraron que aplicaciones de 5 Mg ha⁻¹ de cal dolomita aumentaron el pH de 4,49 a 5,58, la dispo-

nibilidad de potasio, calcio y magnesio en el suelo mejoró la disponibilidad de nutrientes y reguló el efecto tóxico del hierro, lo que influyó en el crecimiento del área foliar.

4 CONCLUSIONES

La información científica consultada en las bases de datos, utilizadas en la búsqueda, permitió concluir que las condiciones de acidez los suelos de la Amazonia colombiana (oxisoles y ultisoles), en particular el aluminio soluble, ocasionan efectos diferenciados en la disponibilidad y absorción de nutrientes como también en la toxicidad de los cultivos. Las especies tolerantes, aunque alcanzan niveles importantes de producción, su rendimiento se ve limitado por la acidez del suelo.

No son del todo claros los mecanismos de respuesta al estrés causado por aluminio reportados para los cultivos abordados en esta revisión (salvo para *Urochloa* sp). Estos parecen presentar adaptación a los suelos ácidos de la región, pero los reportes no son suficientemente concluyentes por lo cual se hace necesario avanzar en el conocimiento sobre los mecanismos de adaptación, los niveles de tolerancia y las prácticas de manejo de estos sembríos.

Por ahora, establecer agriculturas con especies tolerantes a la acidez, es quizás la mejor alternativa para los cultivadores en la región amazónica. Las investigaciones consultadas en esta revisión también sugieren el uso de materiales encalantes y materia orgánica como opción para el manejo de la acidez del suelo, aunque se requiere realizar análisis específicos para la zona, que permitan establecer la dosis requerida, así como su viabilidad económica y edafológica.

Existe información que puede resultar relevante para tomar decisiones relacionadas con el manejo de suelos ácidos, pero en su mayoría, no se encuentra en acceso abierto mientras que su uso se restringe a la escasa capacidad de pago de los investigadores e instituciones académicas y científicas (pocas por demás) que tienen como objeto de estudio los suelos de la Amazonia colombiana.

CONTRIBUCIÓN DE LA AUTORÍA

Gelber Rosas-Patiño: definió la contextualización, el vacío de conocimiento y el propósito de la revisión; definió los términos de búsqueda de la bibliografía y demás fundamentos metodológicos de la investigación, lideró la presentación y discusión de la información y las conclusiones; y coordinó

la escritura del manuscrito y ajustes al documento final. **Edgar Álvaro Ávila-Pedraza:** apoyó el proceso de conceptualización, escritura, revisión y edición del manuscrito. **Verenice Sánchez-Castillo:** realizó aportes importantes en la escritura, revisión y edición del documento final.

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan su agradecimiento a los investigadores de las ciencias del suelo y a los productores del campo, espe-

cialmente a aquellos que deben sortear las dificultades inherentes a los suelos ácidos de la Amazonia colombiana.

FINANCIAMIENTO

No aplica.

LITERATURA CITADA

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>

Agronet, (2023). *Producción nacional por departamento*. <https://www.agronet.gov.co/Paginas/ProduccionNacionalDpto.aspx>

Agudelo-H. WJ., Castillo, B. NC., & Uriel, M.G. (2023). Scenarios of land use and land cover change in the Colombian Amazon to evaluate alternative post-conflict

- pathways. *Sci Rep*, 13, 2152. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-29243-2>
- Alkharabsheh, H.M., Seleiman, M.F., Battaglia, M.L., Shami, A., Jalal, R.S., Alhammad, B.A., Almutairi, K.F., & Al-Saif, A.M. (2021). Biochar and Its Broad Impacts in Soil Quality and Fertility, Nutrient Leaching and Crop Productivity: A Review. *Agronomy*, 11, 993. <https://doi.org/10.3390/agronomy11050993>
- Ambily, K. K. (2022). Rhizosphere adaptations of Natural Rubber (*Hevea brasiliensis*) plants. *Research Square*, 1, 1-21. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-1596248/v1>
- An, F., Li, C.Z., Zhang, T.T., Wang, L.F., Wang, J.K., & Xie, G.S. (2018). Effects of aluminum toxicity on physiological and leaf chlorophyll fluorescent characteristics of rubber tree seedlings. *Ying Yong Sheng Tai Xue Bao*, 29, 4191–4198. <https://doi.org/10.13287/j.1001-9332.201812.006>
- Anderson, G.C., Pathan, S., Easton, J., Hall, D.J.M., & Sharma, R. (2020). Short- and Long-Term Effects of Lime and Gypsum Applications on Acid Soils in a Water-Limited Environment: 2. *Soil Chemical Properties*. *Agronomy*, 10, 1987. <https://doi.org/10.3390/agronomy10121987>
- Aramburu M. F., Vasco S. J., Baudron, F., & Hijmans, J. R. (2023). Estimating lime requirements for tropical soils: Model comparison and development. *Geoderma*, 432, 116421. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2023.116421>
- Ares, A., Molina, E., Cox, F., Yost, R., & Boniche, J. (2002). Fertilización fosforada del pejibaye para palmito (*Bactris gasipaes*) en vivero y en plantación. *Agronomía Costarricense*, 26(2), 63-74. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=43626206>
- Armatmontree, C., Leksungnoen, P., Nansahwang, A., Aramrak, S., Kongsil, P., & Wisawapipat, W. (2023). Iron toxicity downregulates root-proton efflux and decreases zinc accumulation in cassava. *Annals of Agricultural Sciences*, 68(1), 97-104, <https://doi.org/10.1016/j.aos.2023.06.004>
- Anikwe M.A.N., Eze, J.C., & Ibudialo, A.N. (2016). Influence of lime and gypsum application on soil properties and yield of cassava (*Manihot esculenta* Crantz.) in a degraded Ultisol in Agbani, Enugu South-eastern Nigeria. *Soil and Tillage Research*, 158, 32-38. <https://doi.org/10.1016/j.still.2015.10.011>
- Bakari, R., Mungai, N., Thuita, M., & Masso, C. (2020) Impact of soil acidity and liming on soybean (*Glycine max*) nodulation and nitrogen fixation in Kenyan soils. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B - Soil & Plant Science*, 70(8), 667-678. <https://doi.org/10.1080/09064710.2020.1833976>
- Baligar, V. C., & Fageria, N. K. (2005). Aluminum influence on growth and uptake of micronutrients by cacao. *Journal of food agriculture and environment*, 3(3-4), 173-177.
- Barrow, N.J., & Hartemink, A.E. (2023). The effects of pH on nutrient availability depend on both soils and plants. *Plant*

- Soil*, 487, 21–37. <https://doi.org/10.1007/s11104-023-05960-5>
- Delgado, L. B., Calle, D.A., Cardona, S. P., Sánchez, D. C., Bernal, M.G., & Henao, S. Z. (2023). Relationship between soil acidity and productivity of banana (*Musa* spp.) in Urabá, Colombia. *Chilean Journal of Agricultural and Animal Sciences*, 39(2), 228–238. <https://doi.org/10.29393/CHJAA39-20RBLS60020>
- Bekele W. M., Haile W. W., & Kebede Y. F. (2022). Effects of minimum tillage and liming on maize (*Zea mays* L.) yield components and selected properties of acid soils in Assosa Zone, West Ethiopia. *Journal of Agriculture and Food Research*, 8, 100301. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2022.100301>
- Betancourt Y, P., Montilla, I., Hernández, C., y Gallardo, E. (2005). Fertilización nitrogenada en el cultivo de piña (*Ananas comosus* L. Merr) en el sector Páramo Negro, municipio Iribarren estado Lara. *Revista de la Facultad de Agronomía*, 22(4), 382-393. http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0378-78182005000400006&lng=es&tlng=es
- Bossolani, J.W., Costa, C. CA., Merloti, L.F., Moretti, L.G., Costa, N.R., Tsai, S.M., & Kuramae, E.F. (2020). Long-term lime and gypsum amendment increase nitrogen fixation and decrease nitrification and denitrification gene abundances in the rhizosphere and soil in a tropical no-till intercropping system. *Geoderma*, 375, 114476. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114476>
- Bovi, M. L. A., Spiering, S. H., & Saes, L. A. (2004). Peach palm growth and heart-of-palm yield responses to liming. *Revista brasileira de Ciência do Solo*, 28, 1005-1012. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832004000600009>
- Bozzi, Z. L., Ferreira, L. J., dos Santos, A.C., Pellegrino, C. C.E., & Senna, O. T. (2023). Soil carbon and nitrogen stocks following forest conversion to long-term pasture in Amazon rainforest-Cerrado transition environment. *CATENA*, 231, 107346. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2023.107346>
- Cahyono, P., Loekito, S., Wiharso, D., Afandi., Rahmat, A., Nishimura, N., Noda K., & Masateru, S. (2019). Influence of liming on soil chemical properties and plant growth of pineapple (*Ananas comosus* L. Merr.) on red acid soil, Lampung, Indonesia. *Soil Science and Plant Analysis*, 50(22), 2797-2803. <https://doi.org/10.1080/00103624.2019.1671441>
- Carreño, A. y Chaparro G. A. (2013). Tolerancia al aluminio en especies vegetales: mecanismos y genes. *Universitas Scientiarum*, 18(3), 283-310. <http://www.scielo.org.co/pdf/unsc/v18n3/v18n3a04.pdf>
- Cerda, M. G., Salgado, M. G., Esquinca, H. y Gómez, A. I. (2022) Manejo agronómico de la acidez y aluminio en suelos de plantaciones de café, *coffee arabica* en berriozabal, motozintla. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*,

- 6(4), 147-164. https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v6i4.2525
- Che, J., Zhao, X.Q., & Shen, R.F; (2023). Molecular mechanisms of plant adaptation to acid soils: A review. *Pedosphere*, 33(1), 14-22. <https://doi.org/10.1016/j.ped-sph.2022.10.001>
- Chiapini, M., Schellekens, J., Calderi O J., Calegari, R., & Vidal T., P. (2023). Pedogenesis in very deep autochthonous Ferralsols of the Paraná Igneous Province (Brazil). *CATENA*, 224, 106981, <https://doi.org/10.1016/j.catena.2023.106981>
- Chunquan, Z., Wenjun, H., Xiaochuang, C., Lianfeng, Z., Yali, K., Qianyu, J., Guoxin, S., Weipeng, W., Hui, Z., & Junhua, Z. (2021). Physiological and Proteomic Analyses Reveal Effects of Putrescine-Alleviated Aluminum Toxicity in Rice Roots. *Rice Science*, 28(6), 579-593, <https://doi.org/10.1016/j.rsci.2021.03.002>
- Corte, B. J.L., López, A, S.A., Favarin, & J.L. Mazzafera, P. (2020). Review: *Urochloa* in Tropical Agroecosystems. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 4, 2571-581X. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2020.00119>
- da Silva, J. B. F., & Clement, C. R. (2005). Wild pejiabaye (*Bactris gasipaes* Kunth var. chichagui) in Southeastern Amazonia. *Acta Botanica Brasilica*, 19, 281-284. <https://doi.org/10.1590/S0102-33062005000200010>
- de Campos, M., Penn, C. J., González, J. M., & Costa C. C.A. (2022). Effectiveness of deep lime placement and tillage systems on aluminum fractions and soil chemical attributes in sugarcane cultivation. *Geoderma*, 407, 115545. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.115545>
- Deenik, J., Ares, A., & Yost, R. S. (2000). Fertilization response and nutrient diagnosis in peach palm (*Bactris gasipaes*): a review. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 56, 195-207. <https://doi-org.ezproxy.unal.edu.co/10.1023/A:1009847508353>
- Diniz, A.R., da Silva C. S., Pereira, M. G., Zonta, E., Fernandes D. A.C., Souza, A. C.O., & de Moraes A. G.L. (2022). Influence of spatial variability of soil chemical attributes on the nutritional status and growth of the rubber tree. *Bioscience Journal*, 38, e38052. <https://doi.org/10.14393/BJ-v38n0a2022-54026>
- Ejigu, W., Selassie, Y. G., & Elias, E. (2023). Effect of lime rates and method of application on soil properties of acidic Luvisols and wheat (*Triticum aestivum* L.) yields in northwest Ethiopia. *Heliyon*, 9(3), e13988. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e13988>
- Ferreira S. T., Garcia F. B., dos Santos I. R.M., Silva A. S., & Costa F. M.G. (2020). Immunocytochemistry and Density Functional Theory evidence the competition of aluminum and calcium for pectin binding in *Urochloa decumbens* roots. *Plant Physiology and Biochemistry*, 153, 64-71. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2020.05.015>
- Flarian, M.M., Frederick, A.O., Samuel, A.O., John, W. K., & Cosmas, W. (2023). Variations in soil chemical properties and growth traits of tissue culture banana under bio-slurry soil amendments

- in Uganda. *Environmental Sustainability*, 6, 341–357. <https://doi.org/10.1007/s42398-023-00274-9>
- Fung, K., Carr, H., Poon, B., & Wong, M. (2009). A comparison of aluminum levels in tea products from Hong Kong markets and in varieties of tea plants from Hong Kong and India. *Chemosphere*, 75, 955–962. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2009.01.003>
- Furlan, F., Borgo, L., Silveira R. F.H., Lanzoni R. M., Scaglia L. F., Pinheiro M. A., Antunes A. R., & Lavres, J. (2020). Aluminum-induced toxicity in *Urochloa brizantha* genotypes: A first glance into root Al-apoplastic and -symplastic compartmentation Al-translocation and antioxidant performance. *Chemosphere*, 243, 125362. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.125362>
- Gallo F. J.J., Zuluaga Y. I., Restrepo G. A.M., Sosa, C.C., Zapata B. S., Gutiérrez M. J.P., Ghneim H. T. y Quimbaya, M. (2023). Transcriptional analysis in four wild and cultivated rice genotypes identifies aluminum-induced genes. *Plant Stress*, 10, 100247, 2667-064X, <https://doi.org/10.1016/j.stress.2023.100247>
- Gonçalves, D.A.M., Pereira, W.V.d.S., Johannesson, K.H., Pérez, D.V., Guilherme, L.R.G., & Fernandes, A.R. (2022). Geochemical Background for Potentially Toxic Elements in Forested Soils of the State of Pará, Brazilian Amazon. *Minerals*, 12, 674. <https://doi.org/10.3390/min12060674>
- Gregory, P.J., & Wojciechowski, T. (2020). Chapter one - root systems of major tropical root and tuber crops: root architecture, size, and growth and initiation of storage organs. *Adv. Agron*, 161, 1–25. <https://doi.org/10.1016/bs.agron.2020.01.001>
- Guerra, B. E., & Chacón, M. R. (2012). Simbiosis micorrizica arbuscular y acumulación de aluminio en *brachiaria decumbens* y *manihot esculenta*. *Biotechnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial: BSAA*, 10(2), 87-98. <https://revistas.unicauca.edu.co/index.php/biotechnologia/article/view/812/436>
- Jiang, N., Ren, J., Zu, Y., Sun, W., Ma, X., & Bi, Y. (2022). Aluminum Exposure Effect on Cell Wall Pectin Methyl Esterification in Alfalfa with Different Aluminum Tolerance. *Polish Journal of Environmental Studies*, 31(5). <https://doi.org/10.15244/pjoes/149448>
- Junior, G. S.S., Hurtado, A. C., Alves, R. C., Gasparino, E. C., & Santos, D. M. M. (2023). Interactive Role of Silicon on Attenuating Aluminum Toxicity in Sugarcane by Modifying Growth, Root Morphoanatomy. *Photosynthetic Pigments, and Gas Exchange Parameters*. 1-24. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-2662416/v1>
- Hadas, E., Mingelgrin, U., & Fine, P. (2021). Economic cost–benefit analysis for the agricultural use of sewage sludge treated with lime and fly ash. *Int J Coal Sci Technol*, 8, 1099–1107. <https://doi.org/10.1007/s40789-021-00439-z>
- Husain, S.H., Mohammed, A., Ch'ng, H.Y., & Khalivulla, S.I. (2021). Residual ef-

- fects of calcium amendments on oil palm growth and soil properties. IOP Conference Series. *Earth and Environmental Science*, 756(1), 012060. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/756/1/012060>
- Kundu, A., & Ganesan, M. (2020). GhMATE1 expression regulates Aluminum tolerance of cotton and overexpression of GhMATE1 enhances acid soil tolerance of Arabidopsis. *Current Plant Biology*, 24, 100160, <https://doi.org/10.1016/j.cpb.2020.100160>
- Kundu, A., & Ganesan, M. (2023). Low pH stress activates several genes for lateral root formation and detoxification of aluminum ions in Cotton plants. *Plant Stress*, 9, 100188. <https://doi.org/10.1016/j.stress.2023.100188>
- Labanca, E. R.G., Andrade, S. A.L., Kuramae, E. E., & Silveira, A. P.D. (2020). The modulation of sugarcane growth and nutritional profile under aluminum stress is dependent on beneficial endophytic bacteria and plantlet origin. *Applied Soil Ecology*, 156, 103715. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2020.103715>
- Lauricella, D., Butterly, C.R., Weng, Z., Clark, G.J., Sale, P. W.G., Li, G., & Tang, C. (2021). Impact of novel materials on alkalinity movement down acid soil profiles when combined with lime. *J Soils Sediments*, 21, 52–62. <https://doi.org/10.1007/s11368-020-02747-4>
- Li, X., Zhang, X., Zhao, Q., & Liao, H. (2023). Genetic improvement of legume roots for adaption to acid soils. *The Crop Journal*, 11(4), 1022-1033. <https://doi.org/10.1016/j.cj.2023.04.002>
- Li, Z., Huang, F., Hu, B., & Qiu, M. (2022). Detoxification of aluminum by Ca and Si is associated to modified root cell wall properties. *Theor. Plant Physiol.*, 34, 131–142. <https://doi.org/10.1007/s40626-022-00235-3>
- Lin, Q., Huai, Z., Riaz, L., Peng, X., Wang, S., Liu, B., Yu, F., & Ma, J. (2023). Aluminum phytotoxicity induced structural and ultrastructural changes in submerged plant *Vallisneria natans*. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 250, 114484, <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2022.114484>
- Lin, Y. H. (2010). Effects of aluminum on root growth and absorption of nutrients by two pineapple cultivars [*Ananas comosus* L.) Merr.]. *African Journal of Biotechnology*, 9(26), 4034-4041. <https://www.ajol.info/index.php/ajb/article/view/82560>
- Malagón, C. D. (2003). Ensayo sobre tipología de suelos colombianos-Énfasis en génesis y aspectos ambientales. *Rev. Acad. Colomb. Cienc.*, 27(104), 319-342. <https://raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/2082/3506>
- Mbanjwa, W. E., Muchaonyerwa, P., & Hughes, J.C. (2023). Total organic carbon, aluminium and iron in bulk samples and aggregate size fractions of a sandy clay loam humic soil under sugarcane relative to native forest in northern KwaZulu-Natal, South Africa. *Heliyon*, 9(3), e14000, <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e14000>

- Ndiate, N. I., Qun, C. L., & Nkoh, J.N. (2022). Importance of soil amendments with biochar and/or Arbuscular Mycorrhizal fungi to mitigate aluminum toxicity in tamarind (*Tamarindus indica* L.) on an acidic soil: A greenhouse study. *Heliyon*, 8(2), e09009, <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e09009>
- Nie, Z., Li, J., Liu, H., Liu, S., Wang, D., Zhao, P., & Liu, H. (2020). Adsorption kinetic characteristics of molybdenum in yellow-brown soil in response to pH and phosphate. *Open Chem*, 18, 663-8. <https://doi.org/10.1515/chem-2020-0501>
- Ofoe, R., Thomas, R. H., Asiedu, S. K., Wang, P. G., Fofana, B., & Abbey, L. (2023). Aluminum in plant: Benefits, toxicity and tolerance mechanisms. *Frontiers in Plant Science*, 13, 1664-462X. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.1085998>
- Olivera, Y., Machado, R., Del Pozo, P.P., Ramírez, J. y Cepero, B. (2007). Evaluación de accesiones de *Brachiaria brizantha* en suelos ácidos: Época de máximas precipitaciones. *Pastos y Forrajes*, 30(3), 303-313. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0864-03942007000300002&lng=es&tlng=es
- Page, M. J., Moher, D., Bossuyt, P. M., Boutron, I., Hoffmann, T. C., Mulrow, C. D., Shamseer, L., Tetzlaff, J. M., Akl, E. A., Brennan, S. E., Chou, R., Glanville, J., Grimshaw, J. M., Hróbjartsson, A., Lalu, M. M., Li, T., Loder, E. W., Mayo-Wilson, E., McDonald, S., ... & McKenzie, J. E. (2021). PRISMA 2020 explanation and elaboration: updated guidance and exemplars for reporting systematic reviews. *BMJ*, 372(160). <https://doi.org/10.1136/bmj.n160>
- Pavlů, L., Borůvka, O., & Nokodem, A. (2021). Effect of natural and anthropogenic acidification on aluminium distribution in forest soils of two regions in the Czech Republic. *For. Res*, 32, 363–370. <https://doi.org/10.1007/s11676-019-01061-1>
- Peña, V. C.P. y Vanegas, C. G.I. (2010). *Dinámica de suelos amazónicos procesos de degradación y alternativas para su recuperación*. Instituto Amazónico de Investigaciones Científicas “SINCHI”. <https://sinchi.org.co/files/publicaciones/publicaciones/pdf/librosuelosweb.pdf>
- Prietz, J., Villalba, A. G., Häusler, W., Eusterhues, K., Mahakot, S., & Klysubun, W. (2023). Aluminum speciation in forest soils and forest floor density fractions using synchrotron-based XANES spectroscopy. *Geoderma*, 431, 116373, <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2023.116373>
- Punpom, T., Leksungnoen, P., Aramrak, S., Kongsil, P., & Wisawapipat, W. (2022). Triggering root proton efflux as an aluminum-detoxifying mechanism in cassava. *Annals of Agricultural Sciences*, 67(2), 173-180, <https://doi.org/10.1016/j.aosas.2022.10.002>
- Rai, S., Kumar P. S., Mankotia, S., Swain, J., & Satbhai, S. B. (2021). Iron homeostasis in plants and its crosstalk with copper, zinc, and manganese. *Plant Stress*, 1, 100008, <https://doi.org/10.1016/j.stress.2021.100008>

- Rahman, R., & Upadhyaya, H. (2021). Aluminium Toxicity and Its Tolerance in Plant: A Review. *J. Plant Biol*, 64, 101–121. <https://doi.org/10.1007/s12374-020-09280-4>
- Ranjan, A., Sinha, R., Sharma, T. R., Pattanayak, A., & Singh, A. K. (2021). Alleviating aluminum toxicity in plants: Implications of reactive oxygen species signaling and crosstalk with other signaling pathways. *Physiologia Plantarum*, 173(4), 1765–1784. <https://doi.org/10.1111/ppl.13382>
- Ribeiro, A. P., Vinecky, F., Duarte, K. E., Thaís R. S., das Chagas, N.C.R.A., Hell, A.F., da Cunha, B.A. D.B., Martins, P.K., da Cruz C. D., de Oliveira, M. P.A., de Almeida, C. G. M., Magalhães, J. V., Kobayashi, A.K., de Souza, W.R., & Molinari, H.B.C. (2021). Enhanced aluminum tolerance in sugarcane: evaluation of SbMATE overexpression and genome-wide identification of ALMTs in *Saccharum* spp. *BMC Plant Biology*, 300, 21, <https://doi.org/10.1186/s12870-021-02975-x>
- Rodríguez, G. G., Sepúlveda, O. J., Ramírez, C. C., Ortiz, P. F. H., Ramos, C. K., Bermúdez, C. J. G. y Sierra, R. M. I. (2011). Unidades, petrografía y composición química del complejo migmatítico de Mitú en los alrededores de Mitú, Colombia. *Boletín de Geología*, 33(1), 27–42. <http://www.scielo.org.co/pdf/boge/v33n1/v33n1a03.pdf>
- Rosa, S. T.M., Silva, R. G. D., Kumar, P., Kottapalli, P., Crasto, C., Kottapalli, K. R., & Zingaretti, S. M. (2020). Molecular mechanisms underlying sugarcane response to aluminum stress by RNA-Seq. *International journal of molecular sciences*, 21(21), 7934. <https://doi.org/10.3390/ijms21217934>
- Rosado, TL., Freitas, MSM., Carvalho, AJC., Gontijo, I., Pires, AA., Vieira, HD., & Barcellos, R. (2021). Soil chemical properties and nutrition of conilon coffee fertilized with molybdenum and nitrogen. *Rev Bras Cienc Solo*, 45, e0210034. <https://doi.org/10.36783/18069657rbcs20210034>
- Rosas P. G., Puentes, P. Y. J. y Menjivar, F. J. C. (2017). Relación entre el pH y la disponibilidad de nutrientes para cacao en un entisol de la Amazonia colombiana. *Corpoica Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, 18(3), 529–541. https://doi.org/10.21930/rcta.vol18_num3_art:742
- Rosas P. G., Puentes, P. Y. J., & Menjivar, F. J. C. (2019). Liming effect on macronutrient intake for cacao (*Theobroma cacao* L.) in the Colombian Amazon. *Cienc. Tecnol. Agropecu.* 20, 5–28. https://doi.org/10.21930/rcta.vol20_num1_art:1247
- Rosas P. G., Puentes P. Y.J. y Menjivar F. J.C. (2021). Efecto del pH sobre la concentración de nutrientes en cacao (*Theobroma cacao* L.) en la Amazonia Colombiana. *Rev. U.D.C.A Act. & Div. Cient.* 24(1), e1643. <http://doi.org/10.31910/rudca.v24.n1.2021.1643>
- Ruehlmann, J., Bönecke, E., & Meyer, S. (2021). Predicting the Lime Demand of Arable Soils from pH Value, Soil Texture and Soil Organic Matter Content. *Agronomy*, 11, 785. <https://doi.org/10.3390/agronomy11040785>

- Rufyikiri, G., Dufey, J., Nootens, D., & Delvaux, B. (2001). Efecto del aluminio sobre plátanos (*Musa spp.*) cultivados en soluciones ácidas. II. Absorción de agua y nutrientes. *Frutas*, 56(1), 5-16. <https://doi.org/10.1051/frutas:2001107>
- Ruiz, A. C.A., Gutiérrez, B. F., Cortes, G. A.M., & Suárez, A. (2022). A first approximation to the Colombian Amazon basin remnant natural capital. Policy and development implications. *Trees, Forests and People*, 10, 100334. <https://doi.org/10.1016/j.tfp.2022.100334>
- Sancho, H. y Molina, E. (2016). Efecto del Mg y pH en la reducción de la toxicidad de Al en plantas de banano cultivadas en solución hidropónica. *Siembra*, 3(1), 53–66. <https://doi.org/10.29166/siembra.v3i1.260>
- Teixeira, W. G., Álvarez V., V. H., Neves, J. C. L., & Paulucio, R. B. (2020). Evaluation of traditional methods for estimating lime requirement in Brazilian soils. *Revista Brasileira De Ciência Do Solo*, 44, e0200078. <https://doi.org/10.36783/18069657rbcs20200078>
- Tiecher, T., Fontoura, S. M.V., Ambrosini, V. G., Araújo, E. A., Alves, L. A., Bayer, C., & Gatiboni, L. C. (2021). Soil phosphorus forms and fertilizer use efficiency are affected by tillage and soil acidity management. *Geoderma*, 435, 116495, <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2023.116495>
- Turner, D.W., Korawis, C., & Robson, A.D. (1989). Soil analysis and its relationship with leaf analysis and banana yield with special reference to a study at Carnarvon, Western Australia. *Fruits*, 44, 193-203. [file:///C:/Users/57310/Downloads/CIR-ADjournals,+438351_EN%20\(1\).pdf](file:///C:/Users/57310/Downloads/CIR-ADjournals,+438351_EN%20(1).pdf)
- Villegas, D. M., Velásquez, J., Arango, J., Obregón, K., Rao, I. M., Rosas, G., & Ober-son, A. (2020). *Urochloa* grasses swap ni-trogen source when grown in association with legumes in tropical pastures. *Diver-sity*, 12(11), 419. <https://doi.org/10.3390/d12110419>
- Villegas, D. M., Arévalo, A., Sotelo, M., Núñez, J., Moreta, D., Rao, I., ... y Arango, J. (2023). Phenotyping of *Urochloa* hu-midicola grass hybrids for agronomic and environmental performance in the Pied-mont region of the Orinoquian savannas of Colombia. *Grass and Forage Science*, 78(1), 119–128. <https://doi.org/10.1111/gfs.12582>
- Yan, L., Riaz, M., Li, S., Cheng, J., & Jiang, C. (2023). Harnessing the power of exog-enous factors to enhance plant resistance to aluminum toxicity; a critical review. *Plant Physiology and Biochemistry*, 203, 108064, <https://doi.org/10.1016/j.pla-phy.2023.108064>
- Yang, Z., Zhao, P., Peng, W., Liu, Z., Xie, G., Ma, X., An, Z., & An, F. (2022). Clon-ing, Expression Analysis, and Function-al Characterization of Candidate Oxa-late Transporter Genes of HbOT1 and HbOT2 from Rubber Tree (*Hevea brasil-iensis*). *Cells*, 11(23), 3793. <https://doi.org/10.3390/cells11233793>
- Yao, S., Luo, S., Pan, C., Xiong, W., Xiao, D., Wang, A., Zhan, J., & He, L. (2020). Meta-caspase MC1 enhances aluminum-in-

duced programmed cell death of root tip cells in Peanut. *Plant Soil*, 448, 479–494. <https://doi.org/10.1007/s11104-020-04448-w>

Zacháry, D., Filep, T., Jakab, G., Inger, M., Balázs, R., Németh, T., & Szalai, Z. (2023). The effect of mineral composition on soil organic matter turnover in temperate for-

est soils. *J Soils Sediments*, 23, 1389–1402. <https://doi.org/10.1007/s11368-022-03393-8>

Zhu, X.F., & Shen, R. F. (2023). Towards sustainable use of acidic soils: Deciphering aluminum-resistant mechanisms in plants. *Fundamental Research*, 14, 41. <https://doi.org/10.1016/j.fmre.2023.03.004>

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses.



Licencia de Creative Commons

Revista de Investigación Agraria y Ambiental is licensed under a Creative Commons Reconocimiento - No Comercial - Compartir Igual 4.0 Internacional License.

