

# SUELOS ECUATORIALES

Fundada en 1956

Volumen 54 No. 1 y 2 Año 2024

ISSN 0562-5251 versión Impresa

ISSN 2665-6558 versión en Línea

Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo (SCCS)



DOI: <https://doi.org/10.47864>



Afiliada a:  
Unión Internacional de la Ciencia del Suelo  
Sociedad Latinoamericana de la Ciencia del Suelo  
<https://www.sccsuelos.org/revista/>



SUELOS ECUATORIALES  
Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo

# SUELOS ECUATORIALES

Fundada en 1956

ISSN 0562-5351

ISSN-e 2665-6558

---

Volumen 54

No. 1 y 2

Año 2024

---

Revista de la Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo (SCCS)



Editor:

Armando Torrente Trujillo  
Director Científico Centro de Investigación CENIGAA  
Miembro Junta Directiva de la SCCS

Evaluadores en este número:

Deyanira Lobo Luján PhD Universidad Central de Venezuela. Blanca Gonzalez Mendez PhD UNAM México; Leyla Amparo Rojas Escobar PhD SCCS Colombia, Jhony Armando Benavides Bolaños PhD. Univalle Colombia, Maria Angela Pinzon Pinto MSc Universidad de Cundinamarca Colombia, Martha Constanza Daza Torres PhD Univalle Colombia, Jorge I. Chavarro Diaz PhD(c) CENIGAA Colombia, Oscar E. Trujillo Obando PhD Unal Palmira Colombia, Janeth Gonzalez Nivia MSc IGAC Colombia. Jhon Jairo Vargas Hoyos, MSc. Univ. Surcolombia. Conrado de Jesus Tobon Marin. PhD. Univ. Nacional de Colombia.

SUELOS ECUATORIALES 54 (1 y 2), 2024  
Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo

## SOCIEDAD COLOMBIANA DE LA CIENCIA DEL SUELO



**1955-2024**

Fundada en 1955 por Manuel del Llano Buenaventura en la ciudad de Medellín, Facultad de Agronomía, Universidad Nacional de Colombia. Licencia No. 00316 de Marzo 8 de 1972 del Ministerio de Gobierno. La SCCS está afiliada a la Unión Internacional de Ciencia del Suelo y la Sociedad Latinoamericana de la Ciencia del Suelo.

### **JUNTA DIRECTIVA NACIONAL 2025 - 2026**

Martha Marina Bolaños Benavides., *Presidente*. Melissa Lis Gutiérrez., *Vicepresidente*

*Vocales principales:* Martha Marina Bolaños Benavides, Melissa Lis Gutiérrez, Ibonne Geaneth Valenzuela Balcázar, Guillermo López Pérez, Armando Torrente Trujillo.

*Vocales suplentes:* Martha Constanza Daza Torres, Rosalina González Forero, Francisco Enrique Restrepo Higueta, Juan Guillermo Cubillos Hinojosa, Hugo Ruiz Eraso.

Hernando Pedreros, Revisor Fiscal  
Juan Guillermo Cubillos Hinojosa, Secretario Ejecutivo  
Leila Amparo Rojas Escobar, Asesora de Presidencia  
Yakelin Molina Cita, Secretaria Administrativa

### **DIRECTORES DE LOS COMITÉS REGIONALES:**

*Antioquia:* Francisco Restrepo Higueta  
*Eje Cafetero:* Carmen Soledad Morales  
*Cauca:* Edier Humberto Pérez  
*Córdoba y Sucre:* Enrique Combatt Caballero.  
*Cundinamarca y Boyacá:* Hugo Castro Franco.  
*Huila:* Armando Torrente Trujillo  
*Llanos Orientales:* Miguel Andrés Arango Argoti.  
*Nariño:* Hugo Ruiz Erazo  
*Norte de Santander:* Ibonne Valenzuela Balcázar  
*Santander:* Ernesto Olave Ariza.  
*Tolima:* Luis Armando Castilla Lozano  
*Valle del Cauca:* Diana Lucia Correa Moreno.

## **SOCIEDAD COLOMBIANA DE LA CIENCIA DEL SUELO**

Sede Permanente: Carrera 11 No. 66-34, Oficina 202, Bogotá, Colombia  
Teléfono: +57 311 2271731. E-mail: [scsuelo@cable.net.co](mailto:scsuelo@cable.net.co), [scsuelo@gmail.com](mailto:scsuelo@gmail.com)  
Página Web: <https://www.sccsuelos.org>

## POLÍTICA EDITORIAL

Suelos Ecuatoriales es una revista científica cuyo contenido es revisado por evaluadores científicos (peer-review) nacionales e internacionales. La revista se publica anualmente y es editada por la Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo (SCCS), la cual está afiliada a la Unión Internacional de la Ciencia del Suelo y a la Sociedad Latinoamericana de la Ciencia del Suelo. La revista está dirigida a investigadores, profesionales y estudiantes de ciencias agropecuarias, forestales, ambientales, química, ciencias naturales, ciencias de la tierra, ciencias afines con las ciencias del suelo, planeación de territorio, formulación de políticas públicas para la ocupación, explotación, mantenimiento y sostenibilidad del recurso suelo, así como todas las disciplinas relacionadas que puedan incidir en la preservación de este bien natural. Los artículos publicados son resultados originales de investigación científica y tecnológica, de reflexión, de revisión, artículos cortos, reporte de casos, revisión de tema y traducciones. Se pretende con la revista permitir el intercambio de opiniones entre la comunidad nacional e internacional de la Ciencia del Suelo. Se reciben manuscritos en español, inglés, o portugués, con énfasis, pero no exclusivo, sobre suelos del área tropical que sigan las indicaciones establecidas en las "Instrucciones a los autores". Si cumplen con estas normas los manuscritos serán sometidos a evaluación por pares académicos anónimos escogidos por el comité editorial de la revista de acuerdo a su especialidad. Los manuscritos pueden ser rechazados para su publicación o pueden ser aceptados para ser publicados con o sin modificaciones, las cuales deben ser realizadas por los autores en un período de tiempo establecido por el editor. El comité editorial se reserva el derecho de aceptar o no las colaboraciones. La revista se publica con fondos propios de la SCCS, la cual es una entidad sin ánimo de lucro con personería jurídica ante la Cámara de Comercio de Bogotá. Esta revista puede ser adquirida en la oficina de la SCCS; los miembros activos de la SCCS reciben por suscripción automáticamente esta publicación. También puede ser consultada en línea, o en las bibliotecas y hemerotecas especializadas del país donde es enviada.

Los autores interesados en publicar en la revista deben ingresar al sitio web: <https://www.sccsuelos.org/revista/> ecuatoriales, registrarse y seguir proceso de envío de manuscritos.

Página Web: <http://www.sccsuelos.org>

Página revista: <https://www.sccsuelos.org/revista/>

E-mail: [editor.suelosecuatoriales@gmail.com](mailto:editor.suelosecuatoriales@gmail.com)

Los conceptos emitidos por los autores son de su estricta responsabilidad y su publicación no implica respaldo de la revista o de la Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo a sus opiniones.

### COMITÉ EDITORIAL

Editor en Jefe:

Armando Torrente Trujillo  
Director Científico Centro de Investigación CENIGAA  
[editor.suelosecuatoriales@gmail.com](mailto:editor.suelosecuatoriales@gmail.com)

Miembros:

Felipe Macías, Ph.D.  
Universidad de Santiago  
de Compostela, España

Hugo Alberto Ruiz, Ph.D.  
Universidad Federal de Viçosa,  
Brasil

Juan Carlos Menjivar, Ph.D.  
Universidad Nacional  
Palmira, Colombia

Edson Marcio Mattiello, Ph.D.  
Universidad Federal de Viçosa,  
Brasil

Enrique M. Combatt, Ph.D.  
Universidad Federal de Viçosa,  
Brasil

Rosalina González, Ph.D.  
University of Delaware,  
Estados Unidos

Editores Asistentes:

Amparo Rojas  
Ph.D. Ciencia del Suelo

María Ángela Pinzón  
M.Sc. Agrologa

Martha Constanza Daza, Ph.D.  
Ingeniera Sanitaria y Ambiental

### CONSULTORES CIENTÍFICOS

Jorge Etchevers Ph.D., Laboratory of Natural Resources Institute, México; Olegario Muñiz Ph.D., Instituto de Suelos, La Habana, Cuba; Floria Bertsch M.Sc., Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica; Laura Bertha Reyes Ph.D., Universidad Nacional Autónoma de México; Lucy Mora Palomino Ph.D., Instituto de Geología Universidad Nacional Autónoma de México. Rocio del Pilar Pastor Jáuregui Ph.D., Universidad Nacional Agraria La Molina.

Armando Torrente Trujillo  
Director Científico Centro de Investigación CENIGAA  
Editor  
editor.suelosecuatoriales@gmail.com



## EDITORIAL

La Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo está comprometida con el avance de la investigación científica y su difusión en asocio con las universidades, centros de investigación y desarrollo tecnológico, organizaciones científicas nacionales e internacionales, entidades gubernamentales y no gubernamentales, empresas y sectores de la producción con aportes desde las distintas disciplinas del conocimiento y la ciencia en cumplimiento de su misión estratégica relacionada con la adecuada gestión en el uso y la conservación del suelo en beneficio de la sociedad en general.

Como parte de la misión estratégica de la SCCS, se llevó a cabo la realización del XXI Congreso Colombiano de la Ciencia del Suelo en la ciudad de Medellín, sede de su fundación en el año 1955, y bajo el lema “La salud del suelo como base para el desarrollo sostenible”, motivo de la portada del actual volumen, evento que concentró el mayor número de ponencias e intervenciones, y convocó conferencistas nacionales e internacionales en las comisiones de química y fertilidad del suelo; física, manejo y conservación del suelo; biología, microbiología y bioquímica del suelo; génesis, clasificación y cartografía del suelo; enseñanza, ambiente y sociedad; y salud del suelo.

Los paneles de discusión con académicos, científicos y líderes de los diferentes gremios productivos permitió dilucidar y consensuar el papel de la ciencia del suelo en la actualidad y las perspectivas futuras de la investigación. Se resaltó la participación de los niños en un simposio para dialogar sobre la educación de la ciencia del suelo. El lema del Congreso posiciona una mirada holística y sensitiva al suelo reconociendo sus propiedades físicas, químicas y biológicas en el diagnóstico integral para el uso sostenible y la conservación del suelo.

El presente volumen 54 de la revista Suelos Ecuatoriales contiene 10 artículos de los cuales 9 son de investigación y 1 de revisión. Temas de investigación y revisión relacionados con la variabilidad espacial de las propiedades del suelo y respuestas a planes de fertilización, degradación y cambios estructurales que alteran su calidad, biorremediación y metales pesados, dinámica y almacenamiento del agua en el suelo, concentran la atención en la actual presentación de la revista.

Se reconoce el gran esfuerzo de los autores, académicos e investigadores en aportar a la visibilidad de los avances de la ciencia y compartirlos con la comunidad en general, con aportes significativos al conocimiento de la ciencia del suelo. Estos documentos servirán de referencia, consulta y soporte para continuar develando el intrincado y complejo mundo del esencial sustento de la vida: EL SUELO.

**Armando Torrente Trujillo**  
Editor Revista

## INSTRUCCIÓN A LOS AUTORES

Los artículos publicados son resultados originales de investigación científica y tecnológica, de reflexión, de revisión, artículos cortos, reporte de casos, revisión de tema y traducciones. Se pretende con la revista permitir el intercambio de opiniones entre la comunidad nacional e internacional de la Ciencia del Suelo. No se aceptan los que promocionen marcas comerciales o que establezcan antagonismos con otras marcas. El remitente del artículo será el autor para futura correspondencia para lo cual debe suministrar la dirección completa incluyendo correo electrónico y número telefónico. La remisión de un trabajo implica que el mismo no ha sido enviado a otra revista. Es necesario enviar junto con el artículo, una carta en la cual el autor de correspondencia especifique que todos los autores están de acuerdo con someter el manuscrito a revisión para posible publicación en la revista. Se deben adjuntar las hojas de vida de cada autor.

2. Una copia del trabajo completo se debe enviar vía e-mail al correo de la revista, donde se determinará los pares evaluadores científicos para su revisión y estos recomendarán la publicación o no del trabajo. Los evaluadores podrán condicionar la publicación del trabajo a la elaboración de correcciones o ampliación de algún punto del trabajo.

3. Los originales deberán estar escritos a doble espacio, tamaño carta, con márgenes de 2.5 cm en todos los lados. Tipo de letra Times New Roman, tamaño 10, una sola columna. No deberán exceder de 10 páginas, incluyendo tablas y figuras. El texto debe estar en el programa Word y las gráficas en Excel (en blanco y negro).

4. Se debe utilizar el sistema internacional de unidades (SI) y sus símbolos. Además, se debe emplear el sistema de clasificación de suelos del "U.S. Soil Taxonomy". Se aceptarán otros sistemas de clasificación si se indica la respectiva equivalencia.

5. Los trabajos se organizarán de acuerdo con el siguiente esquema general en orden sucesivo: título en español, nombre del autor(es). Resumen y palabras claves; título en inglés, Abstract y Keywords; Introducción; Materiales y Métodos; Resultados y Discusión; Agradecimientos; Referencias.

a) Título: debe ser breve (máximo 20 palabras), conciso y reflejar aspectos específicos del trabajo. Se recomienda No emplear abreviaturas, nombres taxonómicos de organismos, fórmulas químicas ni la clasificación detallada del suelo.

b) Autor (es): se incluirán nombre (s) y primer apellido y la dirección de la Institución a la que pertenece. Indicar el autor de correspondencia.

c) Resumen: es una condensación de las ideas esenciales de los resultados del trabajo. El resumen deberá relacionar claramente el objetivo, método principal, resultados y conclusiones. No se repetirá información dada en el título, ni hará relación a las referencias. Su extensión no excederá 250 palabras. Después del resumen se incluirán cinco palabras clave distintas a aquellas usadas en el título.

d) Abstract: es el resumen anterior en inglés, precedido de la traducción del título y al final las Keywords. Se recomienda a aquellos autores que no manejan el idioma inglés asesorarse adecuadamente para hacer una buena traducción del resumen.

e) Introducción: se debe describir brevemente el problema, la justificación y al final el objetivo del trabajo. El texto deberá ser de un estilo conciso y fácilmente entendible. Los nombres científicos deberán escribirse en cursiva. Para citar trabajos en el texto, se indicará el apellido del autor(es) en minúscula y año de publicación entre paréntesis (Johnson & Smith 2009).

Si se refiere a trabajos realizados por más de dos autores, debe colocarse el apellido del primero, seguido por las abreviaturas "et al." (Anderson et al. 2008). Las fórmulas deben escribirse en forma clara, preste atención a las letras griegas o cualquier otro símbolo no latino. Tener cuidado en diferenciar el cero (0) de la letra o y entre uno (1) y la letra "ele".

f) Materiales y Métodos: se deben describir los métodos utilizados con suficiente detalle para permitir a otro investigador repetir el trabajo; sin embargo, las descripciones técnicas de los métodos sólo se detallarán cuando éstos representen una modificación o novedad. Es necesario dar el significado de todos los símbolos inmediatamente debajo de la ecuación en la cual se utilizaron por primera vez. Sólo aquellas ecuaciones que están explícitamente indicadas en el texto deben numerarse en serie, colocándose un número entre paréntesis al lado derecho. Las notas a pie de página deben usarse sólo en casos necesarios y numerarse indicándolas por números escritos un poco más arriba en el texto, tratando de que sean tan breves como sea posible. Si en las mismas se efectúan referencias, los datos completos figurarán en la lista de referencias.

g) Resultados y discusión: se deben describir los resultados obtenidos y la discusión de los mismos con relación a otros trabajos. Presente los resultados de los análisis estadísticos para soportar los hallazgos, incluya el nivel de significancia (P). Tablas: las tablas no deben exceder el área impresa de una página tamaño carta. Si los datos son numerosos es conveniente distribuirlos en dos o más tablas. No haga uso excesivo de las tablas cuando la información puede darse en pocas líneas en el texto. No repetir en el texto el contenido de las tablas. Deben numerarse de acuerdo con su posición en el texto, en el que deben incluirse referencias de las mismas. El título de cada tabla será corto y lo suficientemente explicativo. El encabezamiento de las columnas será conciso y claro. Figuras: incluye gráficos, esquemas, mapas, fotos, etc.; todas las figuras se presentarán dentro del texto, acompañadas de un título y explicación breve. Deberán numerarse de acuerdo con su ubicación en el texto. Las fotografías en blanco y negro deben estar en formato JPG. Fotos a color se aceptarán si poseen buen contraste e intensidad. No debe repetirse la misma información en tablas y figuras.

h) Agradecimiento: se pueden incluir los reconocimientos a las entidades y personas que colaboraron en la investigación.

i) Referencias: todas las referencias bibliográficas de obras consultadas se presentarán en una lista al final del manuscrito, tanto trabajos publicados como en prensa. Para artículos no publicados, se mencionará el autor en el texto, con una llamada en pie de página, indicando si es un manuscrito no publicado o comunicación personal. La lista bibliográfica deberá presentarse en orden alfabético de los apellidos de los autores y cronológicamente por autor diferenciando con letras minúsculas, después del año, aquellos que correspondan a un mismo año. Se recomienda que la mayoría de la lista bibliográfica incluya el DOI. Utilice abreviaciones para el título de las revistas, para ello utilice la siguiente página web: ([http://www.efm.leeds.ac.uk/~mark/ISlabbr/A\\_abrvjt.html](http://www.efm.leeds.ac.uk/~mark/ISlabbr/A_abrvjt.html)). Considere los siguientes ejemplos:

- Para publicaciones periódicas: GUTIERREZ N, RESTREPO F (2019). Evaluación de correctivos de acidez en un Andisol cultivado con aguacate "Hass" Suelos Ecuat 49 (1y2): 38-44. [https://doi.org/10.47864/SE\(49\)2019p38-44](https://doi.org/10.47864/SE(49)2019p38-44)
- Para libros: ZINCK J (2013) Geopedology. Elements of geomorphology for soil and geohazard studies. ITCSpecial Lecture Notes Series.
- Para simposios, congresos, capítulos de libro de varios autores: RESTREPO L, ÁLVAREZ D, OSORIO S (2004) Remediación de suelos salinos en la alta Guajira, 34-45 pp. En: ZAPATA R, CABRERA K (ed) Estrategias de remediación de suelos degradados. Soc. Col Ci Suelo, Bogotá.

## SCOPE OF THE JOURNAL

Suelos Ecuatoriales is the journal of the Soil Science Society of Colombia (ISSN 0562-5351 On line 2665-6558). This publication was founded in 1956 and is published once a year, in Spanish, English or Portuguese, based on full length original research papers containing new and significant information bearing on broad aspects of soil sciences at both regional and international level. Review articles are accepted if solicited by the Editorial Board. In all cases, manuscripts submitted for publication will be subject to the same review process required of regular submissions.

Manuscripts must be based on original research and contain novel findings of significance, especially up-to-date achievements and advances in the entire field of soil science studies dealing with environmental science, ecology, agriculture, bioscience, geoscience, forestry, etc. Suelos Ecuatoriales also publishes reviews, mini reviews, short communications and special issues; and its areas of particular interest include soil physics, soil chemistry, soil biology and biochemistry, biogeochemical fluxes; geocology; geoaerology; taxonomy; carbon fluxes and fixation, soil fertility and plant nutrition, soil resources and use, soil mineralogy, soil environment and ecology, the soil and its relation with the sociology and the economy of the regions, soil and water conservation, wetland soils, soil salinity and management, soil and plant analysis and technology, soil gases and global change, science related to soil science, land planning, formulation of public policies for the occupation, maintenance and sustainability of the soil, as well as all related disciplines that may affect the preservation of this natural resource.

Authors are responsible for submitting well-written manuscripts, in simple declarative sentences and must conform to accepted standards, style and usage of the language. Contributors who are not native English speakers are strongly advised, prior to submission, to ensure that a colleague fluent in the English language, if none of the authors is so, has reviewed their manuscript. Concise English without jargon should be used. Repetitive use of long sentences and passive tense should be avoided. It is strongly recommended that the text be run through computer spelling and grammar programs. Spelling should be British or American English and should be consistent throughout. Manuscripts may be rejected without paper review by the editor-in-chief if they do not comply with the instructions to authors, or are beyond the scope of the journal.

Indexing/abstracting: Suelos Ecuatoriales is indexed/abstracted in PUBLINDEX of COLCIENCIAS, LATINDEX and REDIB. Ethical issues: authors are responsible for obtaining permission to reproduce copyrighted material from other sources. Any material received without such evidence will be assumed to originate from the authors. The use of someone else's ideas or words in their original form or after changing slightly without a proper citation is considered plagiarism. Even cited properly, if words taken directly from another author's work are not indicated with quotation marks (" "), the author is still guilty of plagiarism.

Cover letter: authors are requested to submit a cover letter to the Editor-in-Chief with their manuscript, outlining their reasons for submitting their manuscript to Suelos Ecuatoriales. Any other information for the Editor-in-Chief should also be included in this letter.

Submission: All manuscripts must be submitted electronically via the internet to the Suelos Ecuatoriales:  
Editorial Office of Suelos Ecuatoriales  
Soil Science Society of Colombia  
Carrera 11 No. 66-34, Of. 202, Bogotá, Colombia  
Telefax: (57-1) 2113383  
editor.suelosecuatoriales@gmail.com

## INSTRUCTIONS TO AUTHORS

Submission of a manuscript to Suelos Ecuatoriales implies that: 1) The work described has not been published before (publication of a poster abstract or an oral presentation is not considered previous publication of the research). 2) It is not under consideration for publication anywhere else. 3) The published in Suelos Ecuatoriales had been approved by all co-authors or the responsible authorities (tacitly or explicitly) at the institute where the work has been carried out. 4) If accepted, it will not be published elsewhere in the same form in any other language without the written consent of the publisher. The publisher will not be held legally responsible should there be any claims for compensation. Preparation of manuscripts: the manuscript has to be submitted at double space, having margins of 2.5 cm in all sides. The specified font is Times New Roman size 11, being one column article. The length of the paper doesn't have a limit of pages for the submitted paper. If the authors would like to include colour figures on their paper, they have to ask previously the cost that would entail, being charged to their accounts. The paper text has to be submitted on Word format and the graphics on Excel (black and white). The international system units (SI) has to be used, as well as the symbols associated. "U.S. Soil Taxonomy" has to be used, and it would be accepted other classification Systems if there is indicated the equivalence to "U.S. Soil Taxonomy". 5) The written documents will be organized according to the following general index, consecutively: Spanish title, Author name(s), Abstract and Key words in Spanish, English title, Abstract and Key words in English, Introduction, Materials and Methods; Results and Discussion; Acknowledgments; References. a) Title: it has to be brief (maximum 20 words), concise and has to reflect specific aspects of the research. It is recommended not to use abbreviations, taxonomical names of organisms, chemical formulas nor soil detailed classification. b) Author (s): the manuscript must include author(s) name (s) and the postal address of the Institution that belongs to. It is necessary to indicate the correspondence author address. c) Abstract in spanish: it has to be a summary of the essential ideas of the work results. This abstract has to relate clearly the main aim of the research, methodology used as well as results and conclusions obtained. It is not allowed to repeat information given on the title or to use references on the abstract. The maximum length is 250 words. After the Spanish abstract, it will be included five key words different from which has been used on the title. d) Abstract in english: It is the translated Spanish version, with a previous title in English and the keywords. It is recommended to the authors that don't have a good command on English to consult somebody to realize a good abstract translation. e) Introduction: Must to describe briefly the problem, the justification of the research and at the end the main aim of the work. The text has to be written in a concise stile and easy to understand. The scientific names have to be on italics. To quote works on the text has to indicate the first name of the author(s) on lower case letter with the publication year, between brackets (Johnson & Smith, 2009). If it is referred to works realized by more than two authors, it has to be written the name of the first author followed by "et al." (Anderson et al., 2008).

The formulas must to be written clearly; especially the Greek letters or other symbols not Latin. It is necessary to put special attention differing zero (0) from o letter, and number one (1) from L lowercase letter.

f) Materials and methods: On this part of the paper it is important to describe the methodologies used sufficiently detailed to allow another researcher to repeat the work, however, the technical descriptions only will be detailed when these would represent an innovation or modification of a normal procedure. It is necessary to give the meaning of all the symbols immediately under the equation when they are used for the first time. Only these equations that are indicated explicitly on the text have to be numbered, writing a number between brackets on the right-hand site. The footnotes have to be used only if is necessary and have to be numbered on superscript being as brief as possible. If in the footnotes it would be necessary to refer some study, the complete information will be on the references list. g) Results and discussion: It is necessary to describe the obtained results as well as the discussion of these, relative to other works. The results have to be submitted, by means of statistical analysis to support the finds, including the significance level (*P*). Tables: It is important not to surpass the impression area. If the data are numerous it would be necessary to distribute it in two or more tables. It is better not to use excessively tables, most of all when the given information could be included on the text. Not to repeat the text information on the tables. The tables have to be numbered according to their position on the text, where it has to appear a reference of them. The table title has to be short and explanatory enough. The table columns headings will be concise and clear. Figures: It could include graphs, sketch, maps, photographs, etc. All the figures that will appear on the text have to be followed by a title and a brief explanation. The figures has to be numbered according to their position on the text, and have to be on white and black in JPG format. Colour photos will be accepted if the intensity and contrast are good and if the author accepts the over cost to publish it. The given information could not be repeated on the tables and figures. h) Acknowledgments: On this section it can be included the recognition of the organizations and persons that collaborated with the research done. i) References: All the bibliographic references have to be exposed in a list at the end of the manuscript, being published works or press papers. The unpublished works will be mentioned as author on the text, with a footnote indicating if it is an unpublished document or a personal communication. The bibliographic list has to follow author name alphabetic order, and if an author appears more than once, it will be ordered chronologically, differed by means of a lowercase letter after the publication year. It is recommended to use the abbreviations for the journals title, as it appears on the following webpage: ([http://www.efm.leeds.ac.uk/~mark/ISIabbr/A\\_abrvjt.html](http://www.efm.leeds.ac.uk/~mark/ISIabbr/A_abrvjt.html)), as on the following examples: Periodical publications: GUTIERREZ N, RESTREPO F (2019). Evaluación de correctivos de acidez en un Andisol cultivado con aguacate "Hass" Suelos Ecuat 49 (1y2): 38-44. [https://doi.org/10.47864/SE\(49\)2019p38-44](https://doi.org/10.47864/SE(49)2019p38-44) Books: ZINCK J (2013) Geopedology. Elements of geomorphology for soil and geohazard studies. ITC Special Lecture Notes Series. Symposiums, congress, bookchapters of several authors: RESTREPO L, ÁLVAREZ D, OSORIO S (2004) Remediación de suelos salinos en la alta Guajira, 34-45 pp. En: ZAPATA R, CABRERA K (eds) Estrategias de remediación de suelos degradados. Soc Col Ci Suelo, Bogotá.



Editorial: Armando Torrente

IV

<p><b>RESPUESTA DE FRIJOL CAUPÍ (<i>Vigna unguiculata</i>) A LA APLICACIÓN DE DOS NIVELES DE FÓSFORO EN EL SUELO Y 7 NIVELES DE SALINIDAD</b></p> <p><b>Response of cowpea bean (<i>Vigna unguiculata</i>) to the application of two levels of phosphorus and 7 levels of salinity in the soil.</b></p> <p><i>Enrique Combatt C., Jaime Hernández B., Jaime Mercado L., María Quiroz B., Eliana Burgo W., Carlos Gómez G., Jesús López P.</i></p>	<p>1-12</p>
<p><b>EFECTO DE LA BIORREMEDIACIÓN EN LA CALIDAD DE AGUA EN UN SISTEMA ACUAPÓNICO CON CARPA KOI Y LECHUGA</b></p> <p><b>Effect of bioremediation on water quality in an aquaponic system with koi carp and lettuce</b></p> <p><i>Angie Lorena Aza-Bastidas, Nayarith Yisela Castro-Pantoja, Diana Marcela Cuaran-López, Brayán Alexander Rosero-Obando, Roberto García-Criollo, Álvaro Javier Burgos-Arco, Iván Andrés Sánchez Ortiz.</i></p>	<p>13-22</p>
<p><b>EFECTO DE LA ANTIGORITA (SILICATO DE MAGNESIO) EN EL ALIVIO DE ESTRÉS POR METALES PESADOS</b></p> <p><b>Effect of antigorite (magnesium silicate) on the relief of heavy metal stress</b></p> <p><i>Yefer Alexander Avellaneda, Nathalia Gutiérrez Toro.</i></p>	<p>23-30</p>
<p><b>ESTIMACIÓN ESPACIAL DE LA HUMEDAD SUPERFICIAL DEL SUELO MEDIANTE INTEGRACIÓN DE DATOS SATELITALES Y VARIABLES GEOAMBIENTALES EN UNA CUENCA TROPICAL ANDINA</b></p> <p><b>Spatial estimation of surface soil moisture through integration of satellite data and geoenvironmental variables in a tropical Andean basin</b></p> <p><i>Doris Helena Serrano Amaya.</i></p>	<p>31-39</p>
<p><b>FACTORES Y MECANISMOS DE FORMACIÓN DE COSTRAS CALCÁREAS ESTRUCTURALES EN SUELOS</b></p> <p><b>Factors and mechanisms of structural calcareous crust formation in soils</b></p> <p><i>Angela Pinzon Pinto, Jorge Alberto Sánchez Espinosa.</i></p>	<p>40-47</p>
<p><b>EFECTO DEL FERTIRRIEGO BAJO DIFERENTES LÁMINAS DE AGUA (Kc) Y MULCH PLÁSTICO, EN EL RENDIMIENTO Y CALIDAD DE FRESA (<i>FRAGARIA X ANANASSA DUCH</i>) VAR. ALBIÓN</b></p> <p><b>Effect of fertigation under different water depths (kc) and plastic mulch, on the yield and quality of strawberry (<i>Fragaria x Ananassa duch</i>) var. Albion.</b></p> <p><i>Karen Stephanie Lucena Riascos, Roberto García-Criollo, Dario Fernando Fajardo Fajardo.</i></p>	<p>48-56</p>
<p><b>EFECTO DEL ORDEN DE SUELO EN LA CORRELACIÓN ENTRE SUS PROPIEDADES Y LOS METALES PESADOS EN EL VALLE DEL CAUCA, COLOMBIA</b></p> <p><b>Effect of soil order on the correlation between its properties and heavy metals in the Valle del Cauca, Colombia</b></p>	<p>57-67</p>

<i>Gilberto Eduardo Marín-Pimentel, Germán Rueda-Saa, Juan Carlos Menjivar-Flores</i>	
<b>DINÁMICA Y ALMACENAMIENTO HÍDRICO EN UN SUELO CON RASGOS REDOXIMÓRFICOS DEL VALLE INTERANDINO TROPICAL: IMPLICACIONES DEL UMBRAL ESTRUCTURAL EN CONDICIONES DE ENDOSATURACIÓN</b>  <b>Water dynamics and storage in a soil with redoximorphic features of the tropical inter-Andean valley: implications of the structural threshold under endosaturation conditions</b>  <i>Oscar Eduardo Trujillo Obando, Enrique Alejandro Torres Prieto, Armando Torrente Trujillo</i>	68-76
<b>VARIABILIDAD ESPACIAL DE PROPIEDADES FÍSICAS DEL SUELO Y RESPUESTA INICIAL DEL BANANO (<i>MUSA AAA</i> CV. <i>WILLIAMS</i>) EN URABÁ, COLOMBIA</b>  <b>Spatial Variability of Soil Physical Properties and Initial Response of Banana (<i>Musa AAA</i> cv. <i>Williams</i>) in Urabá, Colombia.</b>  <i>Ramiro Ramírez Pisco, Edna Ivonne Leiva Rojas.</i>	77-83
<b>DEGRADACIÓN Y CALIDAD DEL SUELO PANORAMA REGIONAL EN EL NORTE DEL DEPARTAMENTO DEL HUILA</b>  <b>Soil Degradation and Quality Regional Overview of the Northern of Huila Department</b>  <i>Armando Torrente-Trujillo, Hugo Leonardo Aristizabal-Martelo.</i>	84-95



# Response of cowpea bean (*Vigna unguiculata*) to the application of two levels of phosphorus and 7 levels of salinity in the soil

## Respuesta de frijol caupí (*Vigna unguiculata*) a la aplicación de dos niveles de fósforo en el suelo y 7 niveles de salinidad

Enrique Combatt C.<sup>1\*</sup>✉, Jaime Hernández B.<sup>1</sup>, Jaime Mercado L.<sup>1</sup>  
María Quiroz B.<sup>1</sup>, Eliana Burgo W.<sup>1</sup>, Carlos Gómez G.<sup>1</sup>, Jesús López P.<sup>1</sup>

1.Department of Agricultural Engineering and Rural Development, Universidad de Córdoba, avenue 6 No. 76-103, Montería, Colombia. Correspondence to author. [emcombatt@correo.unicordoba.edu.co](mailto:emcombatt@correo.unicordoba.edu.co)



Vol. 54 (1 y 2) de 2024 | pp: 1 - 12 | ISSN 0562-5351 E-ISSN 2665-6558 | REC.: 3/04/2025 - ACEP.: 05/09/2025

### ABSTRACT

The cultivation of cowpea is important in the diet of the Caribbean region, where it is grown by small producers. The response of cowpea (*Vigna unguiculata*) to the application of 2 levels of phosphorus under 7 levels of soil salinity was evaluated. The experiment was carried out under greenhouse conditions at the Faculty of Agricultural Sciences of the University of Córdoba. It was carried out under a complete randomized design, with a factorial arrangement, 7 doses of salt in the soil (T1: 0, T2: 230, T3: 460, T4: 828, T5: 1500, T6: 1610 and T7: 2300 kg ha<sup>-1</sup>) x 2 doses of phosphorus (30 and 60 kg ha<sup>-1</sup>). The cowpea variety used was Caupicor 50. The variables evaluated were germination percentage, leaf area, number of nodes, plant height, number of leaves, leaf dry mass, stem dry mass, electrical conductivity and pH. Analysis of variance, Tukey's mean comparison test and interaction decomposition were performed. Phosphorus doses only showed significant differences for pH and plant height, while only Sal\*P interaction was presented for the variables pH and stem dry mass. On the other hand, treatments equivalent to 1500, 1610 and 2300 kg ha<sup>-1</sup> of Na were those that most affected the development of cowpea, and fertilization with high doses of phosphorus in the presence of NaCl contents in the soil did not influence the development of cowpea Caupicor 50. On the other hand, soil pH tends to decrease when phosphorus doses and NaCl contents in the soil increase.

**Key words:** Legume, soils, toxicity, nutritional absorption, nutritional elements.

### RESUMEN

El cultivo de frijol caupí, es importante en la dieta alimentación en la región caribe, donde es sembradas por pequeños productores. Se evaluó la respuesta de frijol caupí (*Vigna unguiculata*) a la aplicación de 2 niveles de fósforo en el suelo bajo 7 niveles de salinidad. El experimento fue realizado bajo condiciones de invernadero en la Facultad de Ciencias Agrícolas de la Universidad de Córdoba. Se realizó bajo un diseño completo al azar, con arreglo factorial, 7 dosis de sal en el suelo (T1: 0, T2: 230, T3: 460, T4: 828, T5: 1500, T6: 1610 y T7: 2300 kg ha<sup>-1</sup>) x 2 dosis de fósforo (30 y 60 kg ha<sup>-1</sup>). La variedad de frijol caupí usada fue Caupicor 50. Las variables evaluadas fueron porcentaje de germinación, área foliar, número de nudos, altura de plantas, numero de hoja, masa seca de hojas, masa seca de tallo, conductividad eléctrica y pH. Se realizó el análisis de varianza, prueba de comparación de medias de Tukey y descomposición de las interacciones. Las dosis de fósforo solo presentaron diferencias significativas para pH y altura de planta, mientras que solo se presentó interacción Salinidad\*P para las variables pH y masa seca de tallo. Por otra parte, los tratamientos que equivalen a 1500, 1610 y 2300 kg ha<sup>-1</sup> de Na, afectaron el desarrollo del frijol caupí y la fertilización

con dosis altas de fósforo en presencia de contenidos de NaCl en el suelo no influyo en el desarrollo de frijol Caupicor 50. Por otro lado, el pH del suelo tiende a disminuir cuando se incrementan las dosis de fósforo y los contenidos de NaCl en el suelo.

**Palabras claves:** Leguminosa, suelos, toxicidad, absorción de nutrición, elementos nutricionales.

## INTRODUCTION

More than 800 million hectares around the world are affected by salts and more than 4% of cultivated areas have this problem (Munns et al., 2008). Likewise, many ions that make up the salts in the soil are toxic to plant cells when they are present in high concentrations externally or internally, and due to high concentrations of salt in the soil, a water deficit or osmotic stress can occur for plants due to the decrease in the osmotic potential in the soil. For this reason, salt stress is considered a growing threat to agriculture worldwide (Zhao, 2007).

In agriculture, plants such as cowpea (*Vigna unguiculata*) present adaptive characteristics to salt stress, developing different mechanisms to reach ionic and osmotic homeostasis in cells (Praxedes et al., 2010, Sprent et al., 2010), and among them are, the increase in the synthesis of abscisic acid (ABA) (Raghavendra et al., 2010), the increase in the concentrations of  $K^+$ ,  $Ca^{2+}$ , amino acids and other compatible ions and solutes (Maathuis et al., 2006), the intracellular compartmentalization of Cl (Turkan et al., 2009), the movement of these ions from the leaves to the roots (Munns et al., 2008, Manchanda et al., 2008) and recently some ultrastructural modifications in chloroplasts have been evidenced (Gómez et al., 2014). Likewise, Carmona et al. (2020) indicate that co-evolution between plants and symbiotic and asymbiotic environments has facilitated the development of defense mechanisms in plants that allow them to protect themselves against harmful effects by implementing strategies to overcome water deficit, regulations in stomatal conductance, and changes in photosynthesis.

On the other hand, among legumes, according to FAO (2012), 11.3 million hectares of cowpea are cultivated worldwide, with an approximate production of 5.7 million tons, and it is considered a very important legume. Mndzebele et al. (2020) states that, in addition to enriching the human diet, cowpea has the capacity to fix a considerable amount of atmospheric nitrogen, reaching up to 337 kg of nitrogen per hectare and can grow in low fertility soils. However, despite its adaptation to stressful conditions (Sprent et al., 2010) there are various factors that contribute to the low productivity of this species, among these factors the management of soil fertility stands out, especially if the supply of phosphorus is insufficient and the fixation capacity in the soil is high (De Olivera, 2012). Therefore, the use of genotypes that are efficient in phosphorus consumption and utilization can be a complementary solution to increasing production (Wang et al., 2010). According to Singh and Reddy (2011), knowledge of cowpea responses to salt stress conditions and the interaction between salinity and the application of available phosphorus in the soil is important because it can help improve the agronomic performance of new cultivars.

In Colombia, and specifically in the Caribbean region, most of the cowpea cultivation areas are located in the departments of Cesar (59.5%), Córdoba (19%) and La Guajira (16.6%), with average yields of 1700 kg ha<sup>-1</sup>. However, in the Caribbean region, specifically in the department of Córdoba, estimates made by IDEAM (2002) indicate that there are approximately more than 7700 km<sup>2</sup> with salinization problems, and considering the

great importance of cowpea in food security in tropical and subtropical developing countries (Nelson et al., 2009) and in the Caribbean region of Colombia, the present work aimed to evaluate the responses of cowpea to the application of two levels of phosphorus under different levels of soil salinity.

## MATERIALS AND METHODS

The experiment was carried out under greenhouse conditions at the Faculty of Agricultural Sciences of the University of Córdoba located at 8° 45' 0" North, 75° 52' 59" West, with an altitude of 18 m.a.s.l., average annual temperature of 28 °C and average relative humidity of 78% (Palencia et al., 2006).

It was carried out under a complete randomized design (DCA) with a 7x2 factorial arrangement: 7 doses of salt in the soil (T1: 0, T2: 230, T3: 460, T4: 828, T5: 1500, T6: 1610 and T7: 2300 kg ha<sup>-1</sup>) x 2 doses of phosphorus (30 and 60 kg ha<sup>-1</sup>), the salt source was NaCl and the phosphorus source was P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>. Each treatment was replicated 4 times (replications), and each experimental unit consisted of 5 kg of soil with a sandy loam texture deposited in a pot or plastic container. Seven days after applying the corresponding treatments (Salt and P), 5 cowpea bean seeds Caupicor 50 were planted in each pot. At 15 days after sowing (das), the less vigorous plants were cut, leaving 3 plants per pot. At 15 and 33 das, all treatments were

fertilized with 20 ml of a KNO<sub>3</sub> solution, and irrigation was applied throughout the trial to maintain field capacity. Variables were measured at 40 das, except for germination percentage (PG: %) which was measured in the first 15 das. The variables measured in the plant were: leaf area (AF: cm<sup>2</sup>), number of nodes (Nud), plant height (ALTP: cm), number of leaves (NH), leaf dry mass (MSH: g), stem dry mass (MST: g).

In addition, 1 kg soil samples were collected from each experimental unit and taken to the laboratory for electrical conductivity (EC: ds m<sup>-1</sup>) and pH measurements, in order to determine how the applied treatments affected the soil conditions where the test was carried out. The collected data were analyzed using analysis of variance and Tukey's mean comparison test, using the SAS 9.1 statistical package. For the variables that presented Salinity\*P interaction, the interaction decomposition was performed, and regressions were also performed for each of the variables with respect to the salt doses in each P treatment, to determine the trend and the adjusted model.

## RESULTS AND DISCUSSION

Table 1 indicates that there was only a highly significant difference between the salt treatments for the variable EC. The mean comparison test indicates that the treatment with the highest EC was 2300 kg ha<sup>-1</sup> of Na with a mean of 14.96 ds m<sup>-1</sup>.

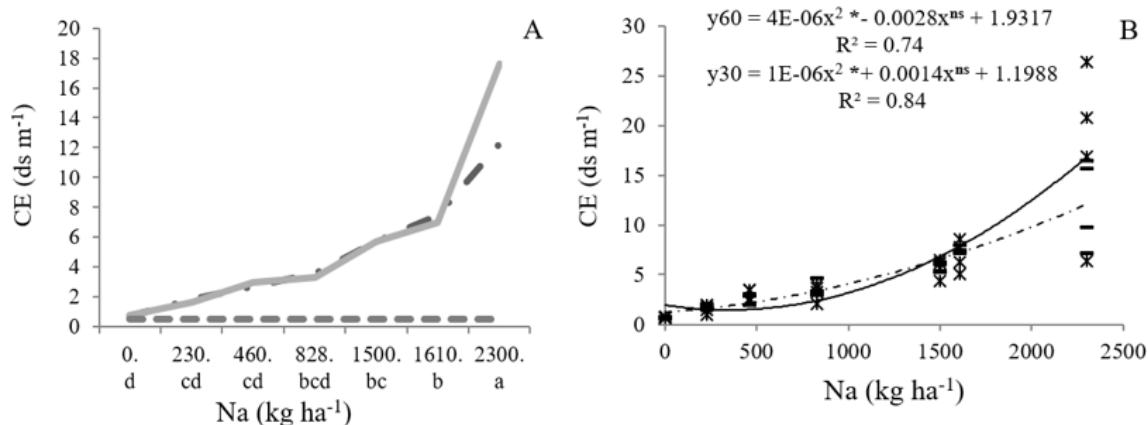
**Table 1.** Results of variance analysis for the application of salinity and phosphorus doses in bean cultivation.

FV	GL	CE	pH	PG	Alt P	Nud
Salinity	6	187.13**	0.14**	4380.95**	7632.42**	111.79**
P	1	6.04 ns	0.21**	178.57 ns	6668.62**	23.27 ns
Salinity*P	6	8.61 ns	0.04**	128.57 ns	254.94 ns	5.39 ns
Error	42	6.97	0.007	359.52	397.83	5.76
Total	55	26.78	0.03	769.74	1285.48	17.60
Mean		5.22	7.72	73.92	60.40	10.10
CV		50.50	1.10	25.64	33.01	23.75

FV: sources of variation, GL: degrees of freedom, CE: electrical conductivity, pH: soil reaction or pH, PG: grain weight, AltP: plant height, Nud: number of nodes. (\*significant, \*\* highly significant, ns not significant at 5%).

The regression indicates a general tendency for EC to increase as more salt was applied to the soil, fitting a quadratic model. The equations that define the models can be seen in Figure 1A. As NaCl content in the soil increases, electrical conductivity increases because NaCl is a fairly soluble salt, while the application of fertilizers contributes little salt to the soil. However, other authors claim that the species is moderately sensitive to salt stress, since it supports a salinity of around  $4.9 \text{ dS m}^{-1}$  (49 mM NaCl) Fageria et al., 2011). In addition, the application of salinity at low doses presented electrical conductivities lower than those reported by Fageria in 2011, with EC of 0.73; 1.71; 2.85 and  $3.42 \text{ ds m}^{-1}$  in treatments T1, T2, T3 and T4, and the pH of all treatments was found to be below 8.5 (Figure 1B).

This shows that the treatments cannot be classified as highly saline soil. However, Pirasteh-Anosheh et al. (2014), consider that the effects that occur under salinity conditions on crop yield and its components are the result of a series of chemical, physiological and biochemical damages, and in turn a series of metabolic, enzymatic and hormonal responses that they experience from the moment the plants begin their germination process, until their biological cycle concludes. Leidi and Pardo (2002) explain that in highly saline solutions a change in electrical potentials is generated, which contributes to a maximum ionic conductivity, and where the electrochemical gradient of  $\text{Na}^+$  is high.



**Figure 1.** Electrical conductivity trend and regressions for different salinity levels, and phosphorus dose for salinity levels. P dose in kg/ha<sup>-1</sup>: y - 30; y — 60. Initial EC values — .

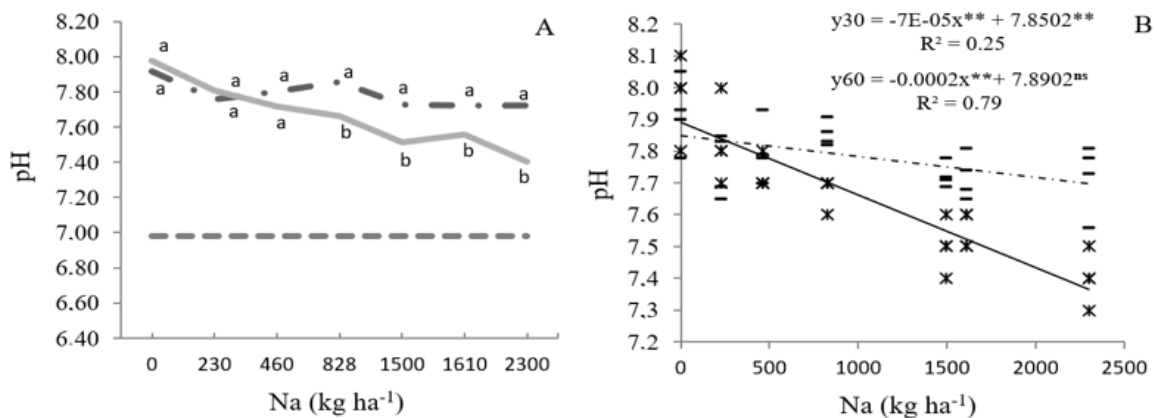
In this research, the pH variable presented a highly significant difference for Sal, P and Sal\*P (Table 1), so the analysis of the decomposition of this interaction was carried out. In Table 2 it is observed that the interaction is given by highly significant differences in the phosphorus doses in the Na doses of 828, 1500, 1610 and 2300 kg ha<sup>-1</sup>, where higher averages are recorded in the 30kg phosphorus treatment (pH= 7.86, 7.73, 7.72 and 7.72 respectively) compared to the 60kg phosphorus treatment (pH= 7.66, 7.51, 7.56 and 7.41).

In Figure 2A it can be observed that the pH increases in a similar way for the two doses of phosphorus in the first 3 salinity levels with respect to the initial pH, and then for the dose of 60 kg of phosphorus it begins to decrease as the salinity levels increase from treatment 4, but without reaching the initial pH value. This agrees with what is recorded in the regression (Figure 2B), where a greater tendency for the pH to decrease is observed in the 60kg phosphorus treatment, with respect to the trend of the 30kg treatment, adjusting to a linear model equation.

**Table 2.** Decomposition of the interactions for pH and stem dry mass in a soil with different doses of NaCl and phosphorus established with cowpea at greenhouse level.

Na (kg ha <sup>-1</sup> )	pH 30	pH60	CM-pH	*MST30	*MST60	CM-MST
0	7.92	7.98	0.0072 <sup>ns</sup>	2.0	2.1	0.0532 <sup>ns</sup>
230	7.76	7.81	0.0098 <sup>ns</sup>	2.0	2.8	1.4893 <sup>**</sup>
460	7.80	7.72	0.0113 <sup>ns</sup>	1.8	2.3	0.5597 <sup>*</sup>
828	7.86	7.66	0.0648 <sup>**</sup>	1.4	1.7	0.2121 <sup>ns</sup>
1500	7.73	7.51	0.1013 <sup>**</sup>	1.5	1.1	0.3787 <sup>ns</sup>
1610	7.72	7.56	0.0578 <sup>**</sup>	1.2	0.5	0.7552 <sup>*</sup>
2300	7.72	7.41	0.2048 <sup>**</sup>	0.7	0.1	0.1138 <sup>ns</sup>

\*pH 30 and 60 are phosphorus doses, CM: mean squares, MST 30 and 60: Dry stem mass at different phosphorus doses, \*significant, \*\*highly significant and ns not significant at 5%.



**Figure 2.** pH trend and regressions for different salinity levels and phosphorus doses for salinity levels. P doses in kg ha<sup>-1</sup>: and 30; and 60. Initial pH values ----

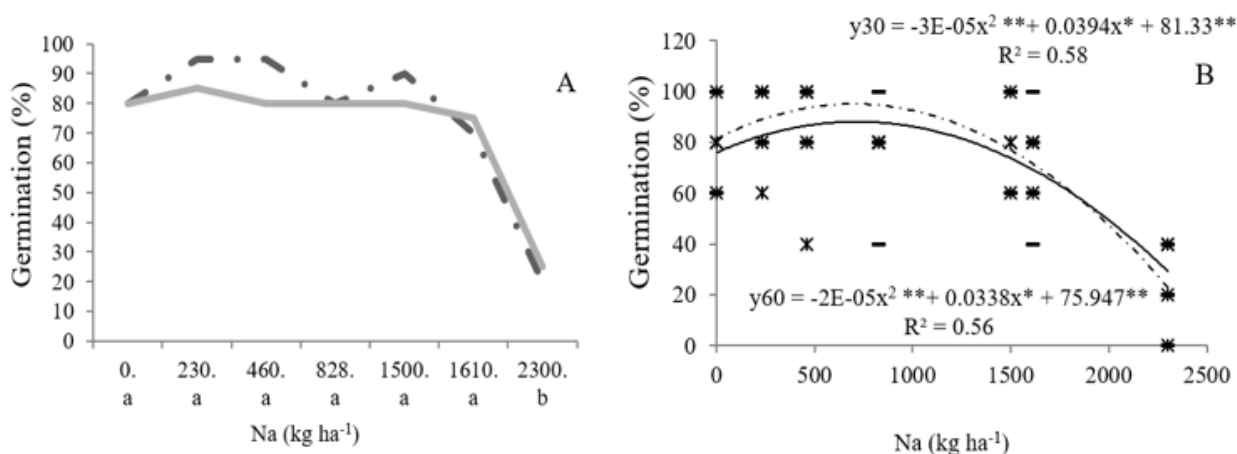
According to Zapata (2000), NaCl arrives dissociated to the soil, and Na<sup>+</sup> displaces H<sup>+</sup> from the exchange sites and these remain in solution, which decreases the pH. However, the decrease in pH in 60 kg of phosphorus can be explained by the reaction of P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> with the different doses of NaCl in the soil. When P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> reaches the soil, it interacts with H<sup>+</sup> and forms H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub><sup>-</sup> in a soluble diacid form and HPO<sub>4</sub><sup>-</sup> in a soluble monoacid form, which should decrease the pH by increasing the free H<sup>+</sup> in solution. Likewise, the dissociated Na<sup>+</sup> reacts with either of the two soluble forms of phosphorus, forming NaPO<sub>4</sub>, displacing the H<sup>+</sup> that will remain in the soil solution, decreasing the pH (Sanzano, 2000), and for this reason, when increasing the doses of P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> a lower pH was found.

Table 1 shows that the germination percentage (PG) showed a highly significant difference between the salt treatments. The mean comparison test shows that the highest germination percentages were between treatments 1 and 6 with a range between 72.5 and 90% (Figure 3A), and this trend can be better appreciated in figure 3B, where the regression shows a trend of lower PG as NaCl levels increase with a slight increase in T2 (230 kg ha<sup>-1</sup>) and T3 (460 kg ha<sup>-1</sup>), fitting a quadratic model.

These results agree with those recorded by Laynez-Garsaball et al. (2007) in a study evaluating the effect of salinity on corn germination, where the percentage and time of germination were affected in soils with higher salt concentrations. Other studies

carried out by Madueño et al. (2006); Taffou et al. (2009) and Kaymakanova (2008) show the same trends. In addition, Can et al. (2014) found that the decrease in germination under extreme salinity conditions is induced by a decrease in water and osmotic potentials, which are a quantitative expression of the

free energy associated with water (Taiz and Zeiger, 2010) and also by the poor capacity of the seed to compartmentalize or exclude the toxic ions of Na<sup>+</sup> and Cl<sup>-</sup> (Práxedes et al., 2011) which increases the concentration of these ions in the embryo, causing a toxic effect (Layne-Garsaball et al., 2007).



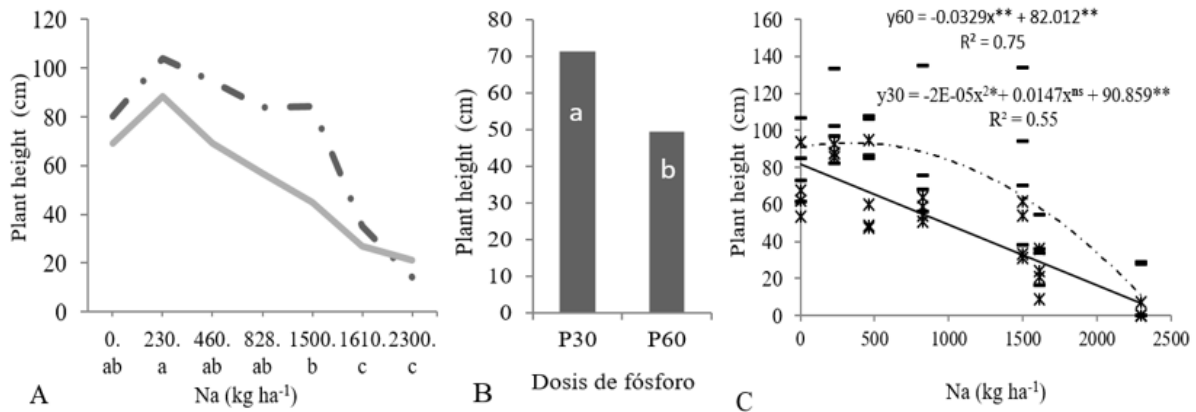
**Figure 3.** Behavior of the germination percentage variable under different doses of sodium in kg ha<sup>-1</sup>: T1: 0, T2: 230 T3: 460 T4: 828, T5: 1500, T6: 1610, T7: 2300 and doses of P in kg ha<sup>-1</sup>: — \* and — 30; — and 60.

The variable plant height presented statistically significant differences between salinity treatments and also for the phosphorus doses (Table 1). According to the mean comparison test, the salinity treatment where the highest plant height was found was T2 (230 kg ha<sup>-1</sup>) with an average of 96 cm and the phosphorus dose where there was the highest height was 30 kg ha<sup>-1</sup>, with an average of 71.3 cm compared to 60 kg ha<sup>-1</sup>, which was 49 cm (Figure 4A). In addition, in relation to the phosphorus doses and independent of the salinity treatments, the phosphorus dose where the highest height was found was 30 kg (Figure 4B). This response to 30 kg of phosphorus on height gain contrasts with the response to phosphorus fertilization in a study conducted by Serna et al. (2011) in corn crops, where the variable plant height was higher with higher doses of P. Furthermore, according to Perez et al. (2024), under these salinity conditions, the use of foliar application

of amino acids is a viable strategy to increase crop productivity.

On the other hand, when analyzing the trend in height gain at each dose of phosphorus, within the salinity levels, an inverse relationship between plant height and salinity is observed in graph 4C, finding greater plant height at the dose of 30 kg of phosphorus, which fits a quadratic model, while with 60 kg of phosphorus, the trend fits better to a linear model. According to Aiazzi (2005), the application of salinity in *Atriplex cordobensis* plants produced a significant decrease in the length of the aerial part in the plants.

According to Martínez (2011), the obvious effect of saline stress can be manifested in the loss of turgor, that is, a plant cell exposed to a saline medium balances its water potential by losing water, which produces a decrease in the osmotic potential and turgor, which are responsible for the mechanical force for cell elongation (Taiz and Zeiger, 2010).



**Figure 4.** Behavior of the plant height variable under different doses of sodium in kg ha<sup>-1</sup>: T1: 0, T2: 230 T3: 460 T4: 828, T5: 1500, T6: 1610, T7: 2300 and doses of P in kg ha<sup>-1</sup>: — \* and — 30; — and 60

The variables leaf number, leaf area, stem dry mass and leaf dry mass (Table 3) showed significant differences for the salinity treatments, and the stem dry mass showed a significant interaction (Salinity \*P). When analyzing the results of the mean comparison test, it is observed that the highest number of

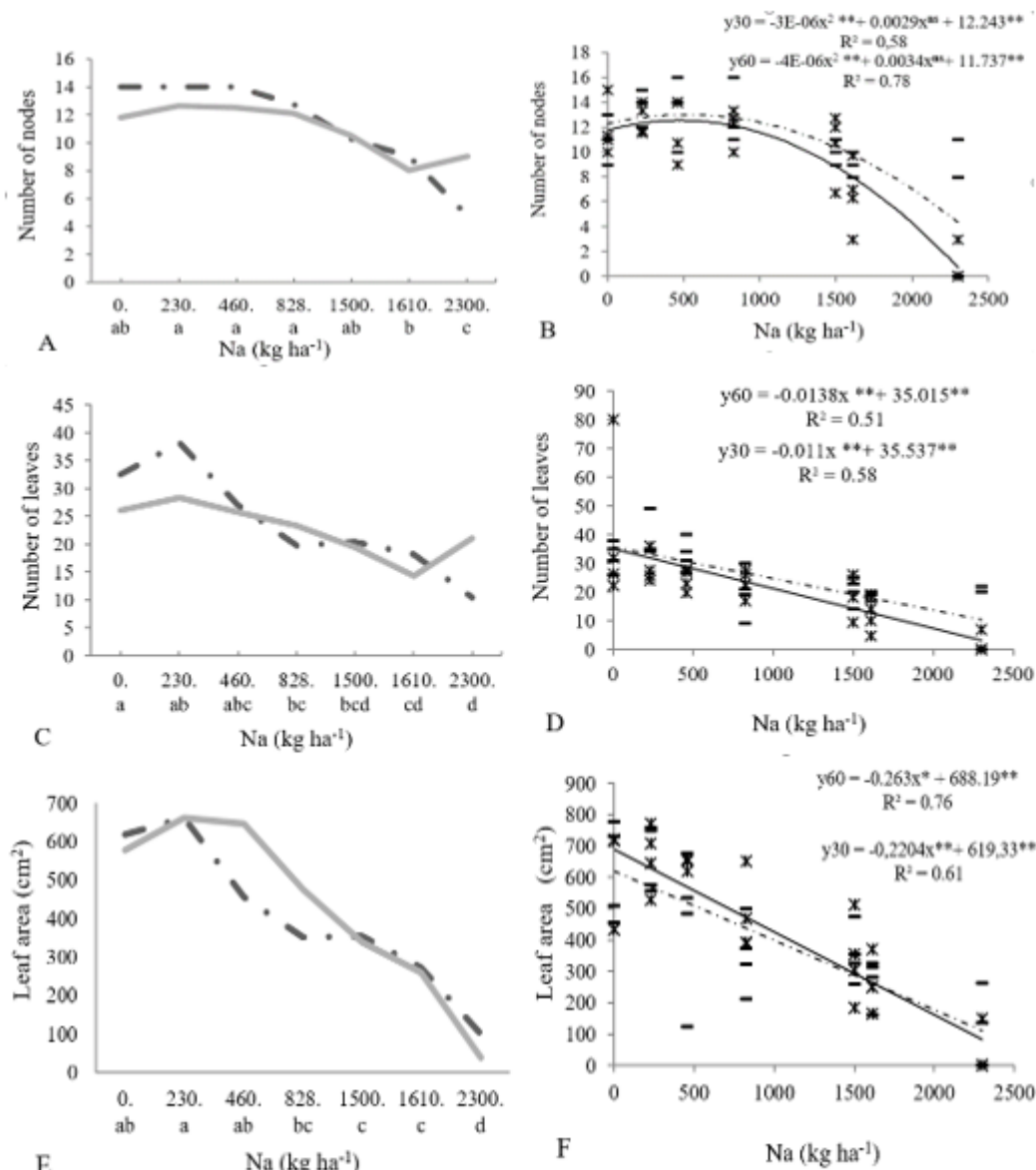
nodes was present in T2 (13.3), T3 (12.7), and T4 (12.4), the highest number of leaves was present in treatments T1 (36.3), T2 (33.3), and T3 (28.7), while the largest leaf area (cm<sup>2</sup>) was found in treatments T2 (661.3), T1 (597.5), and T3 (550.2) (Figure 5 A, C, E).

**Table 3.** Results of variance analysis for the variables number of leaves (NH), leaf area (AF), stem dry mass (SDM), and leaf dry mass (LDM) in a soil with different doses of NaCl and phosphorus established with cowpea at greenhouse level.

FV	GL	NH	AF	MST	MSH
Salinity	6	900.07**	345961.16 **	4.62 **	3.86 **
P	1	156.44 ns	9959.11 ns	0.10 ns	3.49 ns
Salinity*P	6	94.19 ns	17724.94 ns	0.58 **	1.15 ns
Error	42	89.10	15794.79	0.11	1.09
Total	55	179.35	519171.95	0.65	1.44
Mean		23.00	414.56	1.47	1.54
CV		41.02	30.31	22.84	67.79

The general trend in the regression is inverse (Figure 5 A, C, D, E, F) with the soil salinity contents of these three variables, but the nodes evaluated fit a quadratic model (Figure 5 B). In general, it can be said that there was greater development of these variables in the first three treatments, and this is corroborated by the decrease in the number of leaves and nodes, caused by the fact that the soil water is not usable in the treatments with a higher amount of salinity, due to the decrease in water potential. In addition, with high levels of

water stress, senescence and leaf abscission increase (Ichi et al., 2013), and there is a reduction in the size of the leaves and the leaf area (Okon, 2013). In addition, according to Mudgal et al. (2010), in some plants there is activation of some mechanisms, such as the accumulation of compatible solutes (proline and sucrose), and also some structural adaptations such as the swelling of the cell cortex, which are used as a barrier to prevent the entry of Na<sup>+</sup> ions (Hussain et al., 2010).



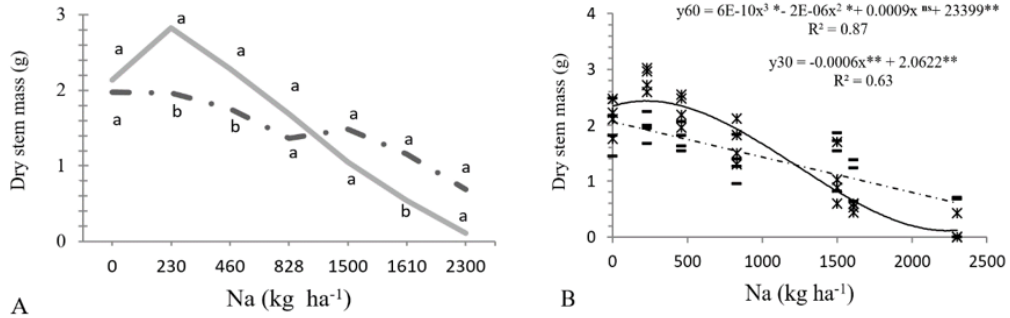
**Figure 5.** Behavior of the variables, number of nodes, number of leaves and leaf area at different doses of phosphorus and salinity. Na dose in kg ha<sup>-1</sup>: T1: 0, T2: 230 T3: 460 T4: 828, T5: 1500, T6: 1610, T7: 2300. P dose in kg ha<sup>-1</sup>: —•— and —•— 30; — and — 60.

The variable dry stem mass presented highly significant differences for Salinity and Salt\*P, so the interaction was broken down. Table 2 shows that the interaction is given by the significant difference between the phosphorus doses in the treatments of 230, 460 and 1610 kg ha<sup>-1</sup> of Na, presenting a highly significant response only in 230 kg ha<sup>-1</sup>, where the highest average with 2.8 g was found in the dose of 60 kg phosphorus, while for the dose of 30 kg it was 2.0 g. Similar results were

found with 460 kg ha<sup>-1</sup>, although the difference between the averages was smaller with 2.3 g in the dose of 60 kg phosphorus and 1.8 g for the dose of 30 kg. The opposite case occurs in the treatment of 1610 kg ha<sup>-1</sup> of Na, where a significant difference was found in favor of the dose of 30 kg of phosphorus with 1.1 g. This response was higher than 0.5 g found at the dose of 60 kg (Figure 6 A). These results can also be seen in Figure 6 B, where the regression shows the trends of the two doses

of phosphorus, fitting a cubic model for the 60 kg dose and a linear model for the 30 kg dose. These results agree with those found by Can

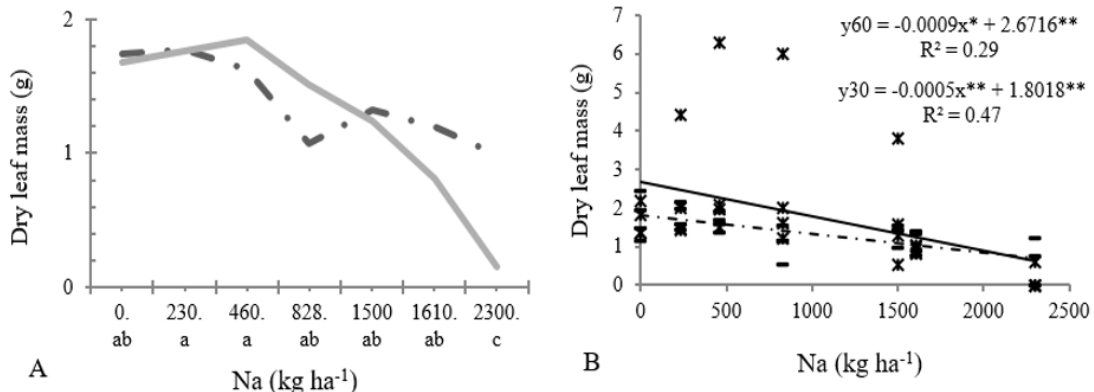
et al. (2014) who report a gradual decrease in stem dry weight as the NaCl dose increased.



**Figure 6.** Behavior of the dry stem mass variables at different doses of phosphorus and salinity. Na dose in kg ha<sup>-1</sup>: T1: 0, T2: 230, T3: 460, T4: 828, T5: 1500, T6: 1610, T7: 2300. P dose in kg ha<sup>-1</sup>: — • and — 30; — and 60.t

The variable stem dry mass showed highly significant differences between salinity treatments (Table 2.). According to the mean comparison test, the treatments with the highest leaf dry mass were 460 and 230 kg ha<sup>-1</sup> with an average of 2.29 g and 2.13 g respectively. The behavior of this variable generally showed a tendency to decrease as the soil salinity content increased (Figure 7 A). In addition, at both phosphorus doses the response was explained by a linear model, similar to the results found in leaf area. Taffouo et al. (2009) found that dry weight is significantly reduced due to osmotic stress and the effect of the specific ions Cl<sup>-</sup> and Na<sup>+</sup>. The decrease in dry mass would be linked

to the decrease in net photosynthesis as soil salinity levels increase (Wilson et al., 2006). This can be explained by the accumulation of starches in chloroplasts due to the inactivation of alpha amylase under saline conditions, which produces a change in the structure of the grains, thus reducing their light-capturing capacity (Humme et al., 2010). This is compounded by the difficult extraction of water by the roots, which donates the electrons necessary for the Hill reaction to occur (Taiz and Zeiger, 2010) and the accumulation of toxic ions whose action influences the production of reactive oxygen species, which affect various organic substances such as lipids, proteins and nucleic acids, culminating in membrane depolarization (Maia et al., 2010).



**Figure 7.** Behavior of the variables dry leaf mass at different doses of phosphorus and salinity. Na dose in kg ha<sup>-1</sup>: T1: 0, T2: 230, T3: 460, T4: 828, T5: 1500, T6: 1610, T7: 2300. P dose in kg ha<sup>-1</sup>: — • and — 30; — and 60.

## CONCLUSIONS

- The increase in soil salt content affected all growth variables in the cowpea crop.
- In the soil, pH tends to decrease when phosphorus doses and NaCl contents in the soil increase.
- The bean variety used (Caupicor 50) showed tolerance to salinity conditions, being affected only by high concentrations of salt in the soil (1610 and 2300 kg ha<sup>-1</sup> of Na) where electrical conductivity values of 7.25 and 15 ds m<sup>-1</sup> were presented respectively.
- The germination of the Caupicor 50 bean variety was affected by excessive NaCl contents in the soil (2300 kg ha<sup>-1</sup> of Na), showing good germination capacity below these salt levels.
- Fertilization with high doses of phosphorus in the presence of NaCl contents in the soil does not influence the development of Caupicor 50 beans.

## REFERENCES

Aiazzi, M.T., Carpane, P y Deza, C. 2005. Efecto de la salinidad, sobre el crecimiento de plantas de *atriplex cordobensis* gandoger et stuckert originadas de semillas de distintas procedencias. *MULTEQUINA* .14: 39-46,

Can, A., Ramírez, L., Ortega, H., Cruz, E., Flores, D., Sánchez, E. y Madueño, A. 2014. Germinación y crecimiento de plántulas de *Phaseolus vulgaris* L. en condiciones de salinidad. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*. 5 (5): 753-763.

Carmona, S. L., Villarreal-Navarrete, A., Burbano-David, D. and Soto-Suárez, M. 2020. Cambios fisiológicos y mecanismos genéticos asociados a la marchitez vascular causada por *Fusarium* en tomate: una revisión actualizada. *Temas Agrarios*, 25(2), 166-189. <https://doi.org/10.21897/rta.v25i2.2457>

De Oliveira Araujo, Érica et al. 2012. Nutritional efficiency of cowpea varieties in the absorption of phosphorus. *Agron. colomb.* [online]. 30 (3): 419-424.

FAO. Faostat Agriculture. 2012. <http://faostat.fao.org/site/567/DesktopDefault.aspx?PageID=567#ancor>

Fageria, N. K., Stone, L. F., Santos, A. B. 2011. Melhoramento para tolerância a salinidade. In: Fritsche Neto, R., Borém, A. Melhoramento de plantas para condições de estresses abióticos. Visconde do Rio Branco: Suprema. 151-176 p.

Gomez P.E. et al. 2014. Ultrastructural alterations into chloroplasts and root nodules of cowpea plants grown under saline stress conditions. *cultrop* [online].35 (1): 62-66.

Humme, E., Osterrieder, A., Robinson, D. G. and Hawes, C. 2010. Inhibition of Golgi function causes plastid starch accumulation. *J. Exp. Bot.* 61(10): 2603-2614.

Hussain, K., Farrukh, M., Majeed, A., Nawaz, K., Hayat, K., Afghan, S., and Shahazad Zia-ul-Hussnain, S. 2010. What molecular mechanism is adapted by plants during salt stress tolerance? *Afr. J. Biot.* 9 (4): 416-422.

Ichi, J.O., Igbadun, H.E., Miko, S. and Samndi. A.M. 2013. Growth and yield response of selected cowpea (*Vigna unguiculata* L. Walp.) variety to irrigation interval and sowing date. *The Pacific J. Sci. Techn.* 14 (1): 453-463.

IDEAM, 2002. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. (2002). *Sistema de Información Ambiental de Colombia (SIAC) Tomo 3*. Recuperado de <http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/002592/TOMO3-PERFIL.pdf>

- Kaymakanova, M., Stoeva, N., and Mincheva, T. 2008. Salinity and its effects on the physiological response of bean (*Phaseolus vulgaris* L.). *J. Central Eur. Agric.* 9(4):749-756.
- Layne Garsaball, J., Rafael Méndez, J. y Mayz-Figueroa, J. 2007. Efecto de la salinidad del suelo sobre la germinación de semillas de maíz de diferentes pesos en el oriente venezolano. *Temas Agrarios*, 12(2), 62-73. <https://doi.org/10.21897/rta.v12i2.658>
- Leidi, E y Pardo, J. 2002; Tolerancia de los cultivos al estrés salino: qué hay de nuevo. Departamento de Biología Vegetal, Instituto de Recursos Naturales y Agrobiología de Sevilla, CSIC Avda. Reina Mercedes 10, 41012 Sevilla, España.
- Maathuis, F. J. M. 2006. The role of monovalent cation transporters in plant responses to salinity. *J. Exp. Bot.* 57 (5): 1137-1147.
- Madueño, M. A., García, P. D., Martínez, H. J. y Rubio, T. C. 2006. Germinación y desarrollo de plántulas de frijolillo *Rhynchosia minima* (L) DC en condiciones de salinidad. *Terra Latinoamericana*. 24(1):47-54.
- Maia, J., Voigt, E., Macedo, C., Ferreira-Silva, S., Silveira, J. 2010. Salt-induced changes in antioxidative enzyme activities in root tissues do not account for the differential salt tolerance of two cowpea cultivars; *Braz. J. Plant Physiol.* 22(1): 113-122.
- Manchanda, G. and Garg, N. 2008. Salinity and its effects on the functional biology of legumes. *Act. Physiol. Plant.* 30: 595-618.
- Martínez, N., López, C., Basurto, M., Pérez R. 2011. Efectos por salinidad en el desarrollo vegetativo, *Tecnociencia*. 5(3): 158p.
- Munns, R. y Tester, M. 2008. Mechanisms of Salinity Tolerance. *The Annu. Rev. of Plant Biol. Revi.* 59: 651-681.
- Mudgal, V., Madaan, N., Mudgal, A., Singh, A. and Kumar, P. 2010. Comparative Study of the Effects of Salinity on Plant Growth, Nodulation, and Leghemoglobin Content in Kabuli and Desi Cultivars of *Cicer arietinum* (L.). *KBMJ. Biol.* 1: 1-4.
- Nelson, C., Rosegrant, M., Koo, J., Robertson, R., Sulser, T., Zhu, T., Ringler, C., Msangi, S., Palazo, A., Batka, M., Magalhaes, M., Valmonte-santos R., Ewing, M. y Lee. D. 2009. Cambio climático: el impacto en la agricultura y los costos de adaptación. Instituto Internacional de Investigación sobre Políticas Alimentarias IPFRI. En: <http://www.fao.org>
- Okon, I.E. 2013. Effect of water stress on some growth aspect of two varieties of cowpea, *Vigna unguiculata* L. Walp. *Fabaceae. Bullet. Environ. Pharmacol. Life Sci.* 2(5): 69-74.
- Palencia, G., Mercado, T., Combatt, E. 2006. Estudio Agrometeorológico del Departamento de Córdoba. Montería: Universidad de Córdoba. 126p.
- Pérez Díaz, Y., Calero Hurtado, A., Peña Calzada, K., Gutiérrez Díaz, J. L. y Rodríguez González, V. 2024. Densidades de plantas y aplicación foliar de aminoácidos incrementan el rendimiento del ajonjolí. *Temas Agrarios*, 29(1), 100-112. <https://doi.org/10.21897/w2sd1542>
- Praxedes, S. C., de Lacerda, C. F., DaMatta, F. M., Prisco, J. T. y Gomes-Felho, E. 2010. Salt tolerance is associated with differences in ion accumulation, biomass allocation and photosynthesis in cowpea cultivars. *J. Agron. Crop Sci.* 196: 193-204.
- Praxedes, S. C., Feitosa, C. L., Montoril, T. F., Tarquinio, J. P., Murilo F. D. y Gomes-Filho, E. 2011. Salt tolerance is unrelated to carbohydrate metabolism in cowpea cultivars. *Acta Physiol. Plantar.* 33: 887-896.

- Pirasteh-Anosheh, H., Kazemeini, S.A., Emam, Y. 2014. The differences in response of *Vigna sinensis* and *Phaseolus vulgaris* to varied salt stress levels. *WALIA journal*.30(1): 95-101.
- Raghavendra, A. S., Gonugunta, V. K., Christmann., A. and Grill, E. 2010. Perception and signaling. *Trends Plant Sci.* 15(7):. 395-401.
- Sanzano, A. 2000. El fósforo del suelo, Cátedra de Edafología. FAZ. UNT.
- Serna, C., Trujillo, L., Urrea, R., 2011; Respuesta del maíz (*zea mays* L.) A la aplicación edáfica de N-P-K en un andisol de la región centro-occidente de Caldas. *Agronomía* 19: 68 – 76.
- Singh, S.K. y Reddy, K.R. 2011. Regulation of photosynthesis, fluorescence, stomatal conductance and water-use efficiency of cowpea (*Vigna unguiculata* (L.)Walp.) under drought. *J. Photochem. Photobiol. B: Biol.* 105: 40-50.
- Sprent, J. I., Odee, W. D. and Dakora, D. F. 2010. African legumes: a vital but under-utilized resource. *J. Exp. Bot.* 61(5):1257-1265.
- Taffouo, V. D., Meguekman, L., Kenne, M., Magnitsop, A., Akoa, A. and Ourry, A. 2009. Salt stress effects on germination, plant growth and accumulation of metabolites in five leguminous plants. *Afr. Crop Sci. Conference Proceedings.* 9:157-161.
- Taiz, L. y E. Zeiger. 2010. *Plant physiology.* 5th ed. Sinauer Associates, Inc. Redwood City, CA.pp.644-645.
- Turkan, I. and Demiral, T. 2009. Recent developments in understanding salinity tolerance. *J. Envir. Exp. Bot.* 67: 2-9.
- Wang, X., Shen, J. and Liao. H. 2010. Acquisition or utilization, which is more critical for enhancing phosphorus efficiency in modern crops. *Plant Sci.* 179: 302-306.
- Wilson, C., X. Liu, S. M. Lesch, and Suarez, D. L. 2006. Growth response of major USA cowpea cultivars. II. Effect of salinity on leaf gas exchange. *Plant Sci.* 170: 1095–1101.
- Zapata Hernández, Raúl D. 2000; Casos especiales de acidez. *Química de la acidez del Suelo*, Cap 6.
- Zhao, G. Q., Ma, B. L. and Ren, C. Z. 2007: Growth, gas exchange, chlorophyll fluorescence, and ion content of naked oat in response to salinity. *Crop Sci.* 47: 123–131.



# Efecto de la biorremediación en la calidad de agua en un sistema acuapónico con carpa koi y lechuga

## Effect of bioremediation on water quality in an aquaponic system with koi carp and lettuce

Angie Lorena Aza-Bastidas<sup>1✉</sup>, Nayarith Yisela Castro-Pantoja<sup>1✉</sup>, Diana Marcela Cuaran-López<sup>1✉</sup>  
Brayan Alexander Rosero-Obando<sup>1✉</sup>, Roberto García-Criollo<sup>1✉</sup>, Álvaro Javier Burgos-Arco<sup>1✉</sup>, Iván Andrés Sánchez Ortiz<sup>1✉</sup>

<sup>1</sup>Universidad de Nariño, Colombia.



Vol. 54 (1 y 2) de 2024 | pp: 13 - 22 | ISSN 0562-5351 E-ISSN 2665-6558 | REC.: 3/03/2026- ACEP.: 28/03/2026

### RESUMEN

La acuaponía es un sistema que integra la acuicultura y la hidroponía, favoreciendo la reutilización de residuos provenientes de efluentes acuícolas, la producción de alimentos de alta calidad y la reducción del impacto ambiental. El objetivo de este estudio fue evaluar el efecto de la biorremediación del agua a través de un sistema acuapónico con lechuga (*Lactuca sativa*) var. Gourmet y carpa koi (*Cyprinus carpio*), empleando tres tipos de sustratos (turba, grava, cascarilla de arroz) sobre la eficiencia de remoción de sólidos, materia orgánica y compuestos nitrogenados en el sistema acuapónico y el rendimiento del cultivo de lechuga. El experimento se desarrolló en la Granja Experimental Botana (Pasto, Colombia) mediante un sistema de recirculación acuícola instalado en invernadero tipo túnel. Se monitorearon parámetros fisicoquímicos del agua y la eficiencia de remoción de sólidos, materia orgánica (DBO<sub>5</sub> y DQO) y compuestos nitrogenados (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, NO<sub>2</sub><sup>-</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>), así como el rendimiento del cultivo. Los resultados obtenidos evidenciaron que las condiciones fisicoquímicas se mantuvieron dentro de los rangos óptimos durante el periodo experimental. No se presentaron diferencias significativas entre sustratos en la remoción de sólidos, materia orgánica ni compuestos nitrogenados ( $p > 0,05$ ), indicando que la biorremediación estuvo asociada principalmente al biofiltro, y a las condiciones operativas del sistema. En contraste, el rendimiento de lechuga fue significativamente mayor en turba (3,69 kg/m<sup>2</sup>) y grava (3,63 kg/m<sup>2</sup>) frente a la cascarilla de arroz (2,53 kg/m<sup>2</sup>), evidenciando que el sustrato influye en la respuesta productiva de las hortalizas. Se concluye que la acuaponía se consolidó como una alternativa ambientalmente sostenible en la biorremediación del agua y la producción de alimentos con valor agregado.

**Palabras clave:** sostenibilidad, biorremediación, productividad.

### ABSTRACT

Aquaponics is a system that integrates aquaculture and hydroponics, promoting the reuse of waste from aquaculture effluents, the production of high-quality food, and the reduction of environmental impact. The objective of this study was to evaluate the effect of three substrates (peat, gravel, and rice hulls) on the bioremediation of water quality and the yield of curly lettuce (*Lactuca sativa*) within an aquaponic system with koi carp (*Cyprinus carpio*). The experiment was conducted at the Botana Experimental Farm (Pasto, Colombia) using a recirculating aquaculture system installed in a tunnel greenhouse. Physicochemical parameters of the water and the removal efficiency of solids, organic matter (BOD<sub>5</sub> and COD), and nitrogen compounds (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, NO<sub>2</sub><sup>-</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) were monitored, in addition to crop yield. The results obtained showed that the physicochemical conditions remained within optimal ranges during the experimental period. No significant differences were found between substrates in the removal of solids, organic matter, or nitrogen compounds ( $p > 0.05$ ), indicating that bioremediation was primarily associated with the biofilter and the system's operating conditions. In contrast, lettuce yield was significantly higher in peat (3.69 kg/m<sup>2</sup>) and gravel (3.63 kg/m<sup>2</sup>) compared to rice hulls (2.53 kg/m<sup>2</sup>), demonstrating that the substrate influences the productive response of the vegetables. It is concluded that aquaponics has become established as an environmentally sustainable alternative for water bioremediation and the production of value-added foods.

**Keywords:** sustainability, bioremediation, productivity.

## INTRODUCCIÓN

El crecimiento sostenido de la población mundial ha incrementado la demanda de alimentos inocuos, producidos bajo criterios de sostenibilidad ambiental (FAO 2020). Sin embargo, los sistemas convencionales de producción acuícola y agrícola continúan enfrentando importantes desafíos asociados a la descarga de efluentes hídricos ricos en nutrientes, los cuales pueden generar procesos de eutrofización y acumulación de residuos. A ello se suma el uso intensivo de fertilizantes y plaguicidas, factores que en conjunto inciden en el deterioro de la calidad del agua, la degradación del suelo y la contaminación de los ecosistemas acuáticos (Cuaspa et al., 2019; Ahmad et al. 2022; Cisneros & Nonones 2024).

Ante este panorama, surge la necesidad de implementar tecnologías orientadas a la valorización de dichos residuos, con el fin de mantener el equilibrio biológico de los sistemas productivos y optimizar eficientemente el uso del agua, el espacio, las especies, la energía y otros insumos, asegurando así su viabilidad a largo plazo (López, 2019).

La acuaponía surge como una alternativa innovadora y sostenible que integra la acuicultura con la hidroponía, favoreciendo el aumento de la producción de alimentos inocuos y con valor agregado (Cuaspa et al., 2019). Este modelo promueve la reutilización de los desechos generados por la actividad fisiológica de los peces y del alimento no consumido, los cuales son retenidos mediante filtración mecánica; a su vez, el efluente pasa a un biofiltro en el cual están adheridas las bacterias nitrificantes responsables de la oxidación del  $\text{NH}_4^+$  a  $\text{NO}_3^-$ , para ser aprovechado como fuente de nutrientes por las plantas, posibilitando así la producción simultánea de peces y vegetales (World Renew & Diaconía Nacional, 2020; Effendi et

al., 2016). De esta manera se disminuye el uso del suelo, los recursos hídricos y minerales, minimizando el impacto ambiental.

Por lo anterior, es importante resaltar que la calidad del agua se considera un factor ambientalmente sensible, dado que la acumulación de sólidos y compuestos nitrogenados puede comprometer la salud y el bienestar de los peces, el desarrollo de las plantas y la estabilidad de los consorcios microbianos que sustentan los procesos de biorremediación (Bandi et al., 2016; Yildiz et al., 2017). En consecuencia, el manejo de estos residuos resulta indispensable para garantizar el adecuado funcionamiento del sistema (Yildiz et al., 2017).

Asimismo, el rendimiento de cultivos hortícolas como la lechuga (*Lactuca sativa*) se constituye como un indicador clave del desempeño ambiental del sistema acuapónico, dado que su crecimiento y productividad dependen directamente de la disponibilidad de nutrientes, la remoción de sólidos y compuestos nitrogenados, así como de las condiciones fisicoquímicas del agua (Bailey & Ferrarezi, 2017; Goddek et al., 2019). Por su parte, la elección de sustratos resulta determinante, ya que materiales como turba, grava o cascarilla de arroz han demostrado propiedades que favorecen el desarrollo de plántulas al aportar porosidad, estabilidad estructural y capacidad de colonización bacteriana (Correal & Rivera, 2023). Dichas características, según Monsalve et al. (2021), convierten a los sustratos en elementos multifuncionales que potencian la nitrificación, facilitan la retención de sólidos y mejoran la disponibilidad de oxígeno, reforzando así la eficiencia integral del sistema acuapónico.

En este sentido, el objetivo de la presente investigación fue evaluar el efecto de la biorremediación del agua a través de un sistema acuapónico con lechuga (*Lactuca sativa*) var. Gourmet y carpa koi (*Cyprinus carpio*), empleando tres tipos de sustratos (turba, grava, cascarilla de arroz) sobre la eficiencia de remoción de sólidos, materia orgánica y compuestos nitrogenados en el sistema acuapónico y el rendimiento del cultivo de lechuga.

## MATERIALES Y MÉTODOS

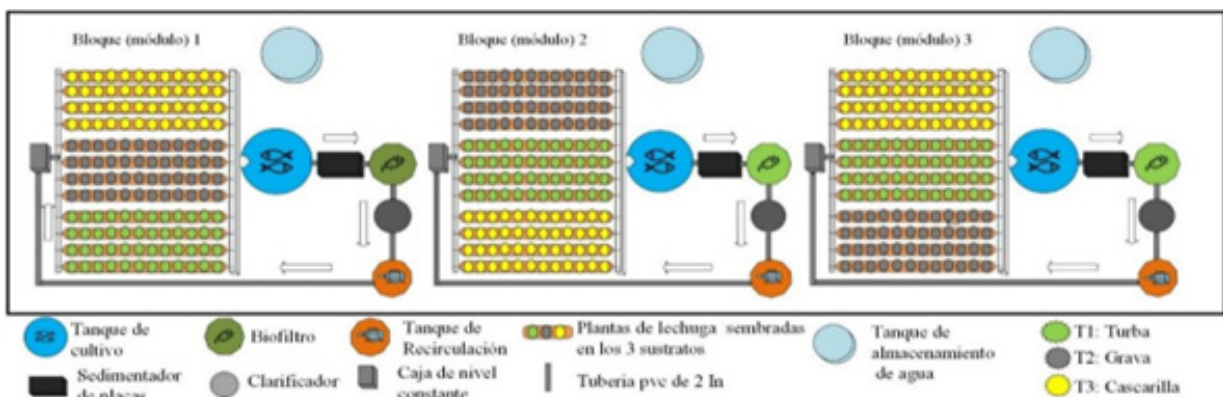
El experimento se llevó a cabo en el municipio de Pasto, en la Granja Experimental Botana, ubicada en el Corregimiento de Catambuco (01° 09' 12" LN y 77° 18' 31" LO), mediante un sistema acuapónico de carpa koi (*Cyprinus carpio*) y lechuga (*Lactuca sativa*), instalado en un invernadero tipo túnel y distribuido en tres módulos productivos que operaron bajo condiciones ambientales y operativas similares. Cada módulo consistió en un sistema de recirculación acuícola (SRA), integrado por un tanque de cultivo con capacidad de 500 L, un sedimentador de alta tasa de 330 L con placas inclinadas a 60°, un biofiltro biológico de 500 L con medio de soporte Kaldnes K1 y un filtro grueso de pulimento de 100 L, provisto de una base circular con malla y

un lecho de grava con granulometría de Ø 1" y ¾". Adicionalmente, el sistema incluyó un sumidero de 250 L equipado con una motobomba sumergible de 0,5 HP, una caja de nivel constante de 80 L y un componente acuapónico.

Previo al ensayo, se inició con un proceso de maduración durante 15 días para el desarrollo de las bacterias nitrificantes. Finalizada esta etapa, se incorporaron 60 peces en cada unidad productiva, para un total de 180 ejemplares, con una densidad de siembra inicial 1,43 kg/m<sup>3</sup> y se finalizó con 8,14 kg/m<sup>3</sup>. Para la siembra de la lechuga cressa se utilizaron 144 plántulas por módulo para un total de 1,440, las cuales fueron germinadas durante un periodo de 15 días. Posteriormente, las hortalizas fueron trasplantadas a vasos plásticos con orificios laterales (1-2 mm con 250 perforaciones por cada vaso) para ser distribuidas en el componente acuapónico. Se implementaron tres tratamientos: turba comercial, grava y cascarilla de arroz quemada, como se observa en la Figura 1.

La evaluación de la remoción de sólidos, materia orgánica y compuestos nitrogenados se realizó mediante la recolección de muestras de agua en recipientes plásticos de 2 L en diferentes puntos de muestreo del sistema acuapónico que se enlistan en la tabla 1.

Los métodos aplicados para la determinación de cada variable de estudio se describen en la tabla 2.



**Figura 1.** Configuración del sistema y distribución de los tratamientos experimentales.

**Tabla 1.** Puntos de muestreo para la determinación de sólidos, materia orgánica y compuestos nitrogenados.

No	Punto de muestreo
P1	Salida de la unidad de cultivo
P2	Salida del sedimentador
P3	Salida del biofiltro
P4	Salida del filtro grueso de pulimento
P5	Salida del sistema agrícola con sustrato turba
P6	Salida del sistema agrícola con sustrato grava
P7	Salida del sistema agrícola con sustrato cascarilla de arroz.
P8	Entrada al sistema agrícola

**Tabla 2.** Variables de estudio y metodologías aplicadas.

Variable	Unidad	Metodología
<b>Parámetros fisicoquímicos</b>		Los parámetros fisicoquímicos fueron monitoreados en el tanque de cultivo; la temperatura (°C) se registró diariamente y cada 15 días se evaluó el pH, la conductividad eléctrica, así como los sólidos disueltos totales, utilizando un medidor multiparamétrico HANNA HI-9813-6. El oxígeno disuelto (mg/L) se determinó con el equipo Vernier Go Direct®. La alcalinidad y la concentración de dióxido de carbono (CO <sub>2</sub> ) se determinaron mediante titulación siguiendo la metodología descrita en el método estándar para el análisis de agua y aguas residuales (APHA, AWWA & WEF, 2023).
<b>Eficiencia de remoción de sólidos, materia orgánica y compuestos nitrogenados</b>	%	Se evaluaron siguiendo la metodología del método estándar para el análisis de agua y aguas residuales (APHA, AWWA & WEF, 2023).  Donde: Ci: Concentración de nutriente en afluente, Cf: Concentración de nutriente en efluente
<b>Rendimiento</b>	t/ha	Se tomó el peso de la parte aérea de las 12 plantas efectivas por tratamiento para posteriormente calcular el rendimiento (kg/m <sup>2</sup> ) dividiendo el peso de las 12 lechugas (kg) entre el área útil de cada tratamiento.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Parámetros fisicoquímicos del agua de cultivo.

En la Tabla 3 se presenta el comportamiento de los parámetros fisicoquímicos evaluados durante el periodo experimental, los cuales evidenciaron condiciones adecuadas de

calidad del agua. En particular, la temperatura, el pH, el oxígeno disuelto y la alcalinidad se mantuvieron dentro de los rangos óptimos reportados en la literatura, favoreciendo el equilibrio químico del agua y el adecuado desarrollo de los procesos implicados con la transformación de los compuestos nitrogenados (Summerfelt et al., 2015).

Según Goddek et al. (2019) y Reyes et al. (2020), la estabilidad de estos parámetros es fundamental para reducir el estrés en los organismos acuáticos y mantener condiciones que garanticen su bienestar durante el ciclo productivo. Asimismo, estas condiciones resultan consistentes con lo reportado por Yildiz et al. (2017), quienes destacan la importancia del control fisicoquímico del agua para sostener el desempeño conjunto de peces y plantas en sistemas acuapónicos. Adicionalmente, los valores de alcalinidad y conductividad eléctrica estuvieron dentro de los rangos recomendados, contribuyendo a la estabilidad química del sistema y al mantenimiento del balance osmótico de los peces, así como a una adecuada

disponibilidad iónica en el componente acuapónico (Wortman, 2015; Vaca, 2023). En términos generales, los parámetros analizados permitieron un funcionamiento estable y controlado del sistema. De acuerdo con otros autores, el  $\text{NH}_4^+$ , el  $\text{NO}_2^-$  y el  $\text{NO}_3^-$  se encontraron dentro del rango permisible para la especie, aspecto coherente con el punto de muestreo de toma de datos que fue en el tanque de cultivo, donde la carga de compuestos nitrogenados suele ser menor (Benavides & Daza, 2020), debido a que en este lugar el aprovechamiento de sustancias nutritivas para plantas y animales es mayor que la excreción de metabolitos de cada uno de los organismos.

**Tabla 3.** Parámetros fisicoquímicos en los tanques de cultivo.

Parámetros	Unidades	M1	M2	M3
pH		7,16 ± 0,27	7,00 ± 0,20	7,12 ± 0,16
Temperatura	°C	23,99 ± 0,60	24,17 ± 0,73	23,57 ± 0,58
OD	mg/L	5,93 ± 0,11	5,90 ± 0,11	5,90 ± 0,09
CO <sub>2</sub>	mg/L	8,80 ± 1,39	6,34 ± 1,15	7,04 ± 0,88
DBO <sub>5</sub>	mg/L	5,90 ± 1,26	5,23 ± 1,48	5,53 ± 1,33
DQO	mg/L	36,80 ± 7,85	29,80 ± 9,12	32,00 ± 8,46
Alcalinidad	mg/L	102,40 ± 12,36	92,40 ± 6,84	96,00 ± 7,62
CE	µS/cm	150,98 ± 20,14	158,58 ± 17,19	152,06 ± 24,83
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	mg/L	1,43 ± 1,41	1,18 ± 1,08	1,39 ± 1,56
NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	mg/L	0,05 ± 0,02	0,04 ± 0,02	0,04 ± 0,02
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	mg/L	3,04 ± 1,97	3,70 ± 2,61	3,34 ± 2,09

Donde: M1 = Módulo 1; M2 = Módulo 2 y M3 = Módulo 3; C.E = Conductividad eléctrica.

### Eficiencias de remoción

La Tabla 4 presenta los resultados de la eficiencia de remoción de sólidos y materia orgánica dentro del sistema acuapónico, en los cuales no se evidenciaron diferencias estadísticas significativas entre los tratamientos para ST, que oscilaron entre 20,18 % y 21,81%; al respecto, Duarte y Gómez (2019) reportan eficiencias más bajas que estuvieron entre 2,11 y 2,96% trabajando en un sistema con tilapia y lechuga, con los mismos sustratos. Respecto a los sólidos

disueltos, los valores encontrados fluctuaron entre 2,15 y 10,71 %; en cuanto a los sólidos suspendidos, sus valores se ubicaron entre 25,06 y 44,93 %; no existiendo diferencias significativas para estas variables dentro del sistema acuapónico. A diferencia de lo reportado por Duarte y Gómez (2019), quienes en iguales condiciones obtuvieron valores superiores para sólidos suspendidos que estuvieron entre 27,07 y 28,40 %, diferencias que podrían atribuirse a variaciones en el diseño del sistema y en el manejo hidráulico.

En cuanto a la materia orgánica, los valores encontrados para DQO oscilaron entre 44,83 y 51,68% y para DBO<sub>5</sub> entre 60,08 y 66,30%, lo que permite inferir que posiblemente la carga orgánica presente en el sistema fue predominantemente biodegradable, lo que favoreció la actividad microbiana y la mineralización de nutrientes.

Si bien la literatura disponible evidencia que este aspecto ha sido poco estudiado en sistemas acuapónicos, lo que limita la

posibilidad de establecer comparaciones directas. No obstante, Rodríguez (2016) señala que una elevada carga orgánica reduce la eficiencia en la mineralización de nutrientes y limita la oxigenación en las raíces de las plantas; considerando la configuración implementada, estos efectos fueron mitigados, ya que probablemente se favoreció una adecuada disponibilidad de nutrientes y se permitió una asimilación efectiva por parte de las plantas, sin evidencias de deficiencias ni acumulación excesiva en solución.

**Tabla 4.** Eficiencia de remoción de materia orgánica y sólidos

Tratamiento	DQO (%)	DBO <sub>5</sub> (%)	ST (%)	SS (%)	SD (%)
T <sub>1</sub> (Turba)	51,68 ± 9,77	66,30 ± 10,32	21,81 ± 18,74	28,40 ± 22,94	16,26 ± 1,78
T <sub>2</sub> (Grava)	47,69 ± 10,29	63,14 ± 10,00	21,01 ± 18,64	27,98 ± 22,18	15,35 ± 2,52
T <sub>3</sub> (Cascarilla de arroz)	44,83 ± 10,80	60,08 ± 9,97	20,18 ± 18,55	27,07 ± 21,57	14,88 ± 2,56

No se presentaron diferencias significativas entre los tratamientos para las variables evaluadas ( $p > 0,05$ ). ST: sólidos totales, SS: sólidos suspendidos, SD: sólidos disueltos.

La Tabla 5 muestra las eficiencias obtenidas en la remoción de compuestos nitrogenados dentro del sistema acuapónico. Los valores para NH<sub>4</sub><sup>+</sup> oscilaron entre 28,83 y 32,69%, variable que no presentó diferencias significativas entre los tratamientos; respecto a estos valores, Jaramillo y Ramos (2018) registraron porcentajes del 45%, inferiores a los valores encontrados en la presente investigación. En ese sentido, Alam et al. (2020) indicaron valores de 28–40 % para sustratos como la cascarilla de arroz. Estas diferencias posiblemente se pueden atribuir a la actividad microbiana en el biofiltro, que cumple un rol predominante en la oxidación del NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, mientras que los sustratos actúan como medios de adhesión biológica.

Respecto a la remoción de NO<sub>2</sub><sup>-</sup> variaron entre 23,45 y 26,20%, indicando un comportamiento homogéneo entre los tratamientos, sin

diferencias significativas. Estos resultados se encuentran dentro de los rangos reportados por Jaramillo y Ramos (2018) y Oladimeji et al. (2020), quienes señalan variaciones entre 18 % y 39 % según el tipo de sustrato y la configuración del sistema acuapónico. De manera concordante con los resultados del presente estudio, Hamid et al. (2022) señalan eficiencias cercanas al 22 % para sustratos de grava.

En relación con los NO<sub>3</sub><sup>-</sup> se obtuvieron valores de 22,63 y 25,64%, sin evidenciarse variaciones significativas entre los tratamientos. Estos resultados son comparables con los reportados por Jaramillo y Ramos (2018) presentando valores próximos al 25 % en sistemas acuapónicos con tilapia roja y lechuga. Por su parte, Oladimeji et al. (2020) señalaron porcentajes entre 28 y 29 % al emplear sustratos orgánicos a base de cascarilla y Hamid et al. (2022) registraron cifras ligeramente superiores, próximas al 30 %, diferencias probablemente atribuidas a

la tasa de absorción vegetal, la densidad de siembra y el balance entre la producción de  $\text{NO}_3^-$  por nitrificación y su consumo por las plantas.

El comportamiento similar observado en los tres sustratos indica un proceso de nitrificación estable favorecido por niveles adecuados

de oxígeno disuelto y pH, lo cual limita la acumulación de  $\text{NO}_2^-$  y confirma la actividad de las bacterias nitrificantes. De este modo, la eficiencia no depende exclusivamente del material utilizado, sino de factores operativos como el tiempo de retención hidráulico, la aireación y la carga de contaminante.

**Tabla 5.** Eficiencia de remoción (%) de compuestos nitrogenados en los tratamientos.

Tratamiento	$\text{NH}_4^+$	$\text{NO}_2^-$	$\text{NO}_3^-$
T <sub>1</sub> (Turba)	31,39 ± 5,31	26,20 ± 8,93	25,64 ± 9,60
T <sub>2</sub> (Grava)	32,69 ± 5,34	26,07 ± 8,67	24,92 ± 10,63
T <sub>3</sub> (Cascarilla de arroz)	28,83 ± 6,30	23,45 ± 8,03	22,63 ± 8,78

En relación con la variable rendimiento del cultivo de lechuga (*Lactuca sativa* L.) var. gourmet, se observaron diferencias estadísticas significativas entre tratamientos (Tabla 6), presentando los mayores valores promedio los sustratos turba (3,69 kg/m<sup>2</sup>) y grava (3,63 kg/m<sup>2</sup>), valores que escalados a hectárea equivalen a 36,9 y 36,3 t/ha de lechuga crespa, respectivamente, mientras que la cascarilla de arroz registró el rendimiento más bajo (2,53 kg/m<sup>2</sup> equivalente a 25,3 t/ha), presentando diferencias estadísticas significativas respecto a los dos sustratos anteriores.

Estos resultados de rendimiento de lechuga posiblemente se pueden atribuir a las características que presentan la turba y la grava, que favorecieron la retención y liberación gradual de nutrientes en el sistema acuapónico, aumentando la disponibilidad de  $\text{NO}_3^-$  en el agua y facilitando su absorción por las plantas. Al respecto, López y Frezza (2022) resaltan la importancia de la absorción de nitrógeno en estos sistemas acuapónicos que oscilan entre 1 y 2,5 kg/ha. N por tonelada de materia seca producida.

En términos comparativos, los rendimientos obtenidos superan los valores promedio reportados para métodos tradicionales de cultivo a nivel nacional y regional (Nariño), estimados en 1,83 y 2,4 kg/m<sup>2</sup>, respectivamente

(Ortiz, 2023). Asimismo, estos resultados son superiores a los informados por Petersen (2008) en sistemas acuapónicos (2 kg/m<sup>2</sup>), aunque inferiores a los reportados por Rodríguez et al. (2022), quienes alcanzaron hasta 4,75 kg/m<sup>2</sup> en la misma variedad bajo condiciones acuapónicas. Por su parte, Villa et al. (2018) reportan en hidroponía pesos promedio por planta cercanos a 487 g y rendimientos de 24.333 kg/m<sup>2</sup>, mientras que en el suelo se obtienen pesos inferiores (420–450 g por planta) y valores alrededor de 6.900 kg/m<sup>2</sup>; resultados cercanos han sido descritos por Cruz (2016). Lo que demuestra que estos sistemas de producción en acuaponía son alternativa eficiente no solo en términos de productividad, sino también de tiempo, ya que los ciclos del cultivo pueden pasar de 60 días en campo abierto a 45 días en situaciones de sistemas de recirculación.

Valores con literales distintos en la misma columna indican diferencias estadísticamente significativas.

**Tabla 6.** Rendimiento de la lechuga en los tratamientos del sistema acuapónico.

Tratamiento	Rendimiento (kg/m <sup>2</sup> )
T <sub>1</sub> (Turba)	3,69 a
T <sub>2</sub> (Grava)	3,63 a
T <sub>3</sub> (Cascarilla de arroz)	2,53 b

## CONCLUSIONES

Los tres sustratos (turba, grava, cascarilla) en sistema acuapónico fueron eficientes y mostraron un comportamiento similar frente a la remoción de sólidos, materia orgánica y compuestos nitrogenados.

El rendimiento obtenido en el cultivo de lechuga bajo el sistema acuapónico mostró que los sustratos de turba y grava superaron los promedios nacionales para sistemas de producción acuapónicos.

Los resultados de la presente investigación evidenciaron que el sistema acuapónico fue muy eficiente en términos de la biorremediación de la calidad del agua, respecto a la eficiencia de transformación de la carga de sólidos, materia orgánica y compuestos nitrogenados, garantizando la calidad hídrica dentro de los rangos óptimos para el crecimiento de peces y plantas.

## AGRADECIMIENTO

A la Vicerrectoría de Investigación e Interacción Social de la Universidad de Nariño por el apoyo institucional y la financiación otorgada para la ejecución de la investigación en el marco de la convocatoria Docente 2020. Al programa de Ingeniería en Producción Acuícola y a la Granja Experimental Botana, por facilitar las instalaciones e infraestructura para la realización del trabajo de campo.

## REFERENCIAS

AHMAD, A., CHIN, J., HARUN, M., & LOW, S. (2022). Environmental impacts and imperative technologies towards sustainable treatment of aquaculture wastewater: A review. *J Water Process Eng*, 46, 102553. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2021.102553>

ALAM, H., OTHMAN, I., SAMSUDIN, S., JOHARI, A., HASSIM, H., & KAMARUDDIN, M. (2020). Carbonized rice husk and cocopeat as alternative media bed for aquaponic system. *Sains Malaysiana*, 49(3), 483 - 492. <https://doi.org/10.17576/jsm-2020-4903-03>

AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION (APHA), AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION (AWWA), & WATER ENVIRONMENT FEDERATION (WEF). (2023). *Standard methods for the examination of water and wastewater* (W. Lipps, E. Braun y T. Baxter, Eds.; 24.ª ed.).

BAILEY, D., & FERRAREZI, R. (2017). Valuation of vegetable crops produced in the UVI Commercial Aquaponic System. *Aquacul Rep*, 7, 77-82. <https://doi.org/10.1016/j.aqrep.2017.06.002>

BANDI, A., CRISTEA, V., DEDIU, L., PETREA, S., CRETU, M., RAHOVEANU, A., ZUGRAVU, A., TUREK, M., MOCUTA, D & SOARE, I. (2016). The Review of Existing and In-Progress Technologies of the Different Subsystems Required for the Structural and Functional Elements of the Model of Multi-Purpose Aquaponic Production System. *Rom Biotechnol Lett*, 21(4), 11621-11631. [https://www.researchgate.net/profile/Mirela-Cretu/publication/308916750\\_1\\_1/links/57f7579508ae91deaa604427/1-1.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Mirela-Cretu/publication/308916750_1_1/links/57f7579508ae91deaa604427/1-1.pdf)

BENAVIDES, C., & DAZA, Y. (2020). Evaluación de parámetros fisicoquímicos y microbiológicos en agua de un sistema acuapónico para la producción de cachama blanca (*Piaractus brachypomus*), fresa (*Fragaria vesca*) y albahaca (*Ocimum basilicum*) (Trabajo de grado, Fundación Universitaria de Popayán). <https://fupvirtual.edu.co/repositorio/s/repositorio/item/11348>

- CISNEROS, G., & NONONES, N. (2024). Impact of the use of fertilizers on agricultural soils: A systematic review of scientific literature. En Proceedings of the 22<sup>nd</sup> LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education, and Technology: Sustainable Engineering for a Diverse, Equitable, and Inclusive Future at the Service of Education, Research, and Industry for a Society 5.0. <https://doi.org/10.18687/LACCEI2024.1.1.391>
- CORREAL, S., & RIVERA, J. (2023). Evaluación de la eficiencia de sustratos orgánicos alternativos como sustitutos de la turba en la plantulación de tomate (trabajo de grado) Universidad Santo Tomás. Repositorio Institucional. <https://repository.usta.edu.co/bitstreams/4f02f1f1-ef0e-46e0-994b-40e1c00730ff/download>
- CRUZ, A. (2016). Evaluación de tres variedades del cultivo de lechuga (*Lactuca sativa* L.) en dos sistemas de hidroponía bajo ambiente semi controlado en el centro experimental chocloca. Ventana Científica, 7 (12), 31-42. <https://dicyt.uajms.edu.bo/revistas/index.php/ventana-cientifica/article/view/2>
- CUASPA, J., GUERRERO, D., & BURGOS, A. (2019). Sistemas acuapónicos como alternativa sustentable en la acuicultura. Revista de investigación Pecuaria, 6 (1), 95-103. <https://doi.org/10.22267/revip.1961.9>
- DUARTE, D., & GÓMEZ, Á. (2019). Evaluación del porcentaje de remoción de sólidos de un sistema acuapónico de tilapia roja (*Oreochromis* sp) y lechuga (*Lactuca sativa*) con tres diferentes sustratos en la Granja Experimental Botana, municipio de Pasto (trabajo de grado) Universidad de Nariño. Repositorio Institucional. <https://sired.udenar.edu.co/15493/1/93176.pdf>
- EFFENDI, H., WAHYUNINGSIH, S., & WARDIATNO, Y. (2016). The use of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) cultivation wastewater for the production of romaine lettuce (*Lactuca sativa* L. var. *longifolia*) in water recirculation system. *Appl Water Sci*, 7(6), 3055-3063. <https://doi.org/10.1007/s13201-016-0418-zHU>
- GODDEK, S., JOYCE, A., KOTZEN, B., & BURNELL, G. (2019). Aquaponics Food Production Systems. Springer Open. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-15943-6>
- HAMID, S., LANANAN, F., MOHD. N., & ENDUT, A. (2022). Physical filtration of nutrients utilizing gravel-based and lightweight expanded clay aggregate (LECA) as growing media in aquaponic recirculation systems (ARS). *Aquac Eng*, 98, 102261. <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2022.102261>
- JARAMILLO, M., & RAMOS, E. (2018). Evaluación de la remoción de compuestos nitrogenados de un sistema acuapónico compuesto por tilapia y lechuga utilizando tres tipos de sustratos (turba comercial, grava y cascarilla de arroz) bajo condiciones de invernadero en la Granja Experimental Botana, municipio de Pasto (trabajo de grado) Universidad de Nariño.
- LÓPEZ, J. (2019). Cultivo acuapónico aquaponic culture - tool kit guía especializada. Aula del mar. <https://cifalmalaga.org/publicacion/cultivo-acuoponico-guia-especializada/>
- MONSALVE, O., HENAO, M., & GUTIÉRREZ, J. (2021). Caracterización de materiales con uso potencial como sustratos en sistemas de cultivo sin suelo. *Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, 22(1), 1–23. [https://doi.org/10.21930/rcta.vol22\\_num1\\_art:1977](https://doi.org/10.21930/rcta.vol22_num1_art:1977)

- OLADIMEJI, A. S., OLUFEAGBA, S. O., AYUBA, V. O., SOLOMON, S. G., & OKOMODA, V. T. (2020). Effects of different growth media on water quality and plant yield in a catfish–pumpkin aquaponics system [Efectos de diferentes medios de crecimiento sobre la calidad del agua y el rendimiento vegetal en un sistema acuapónico de bagre y calabaza]. *J. King Saud Univ. Sci.*, 32(1), 60–66. <https://doi.org/10.1016/j.jksus.2018.06.003>
- ORGANIZACIÓN DE LAS NACIONES UNIDAS PARA LA ALIMENTACIÓN Y LA AGRICULTURA. (2020). *El estado mundial de la pesca y la acuicultura 2020: La sostenibilidad en acción*. FAO. <https://www.fao.org/3/ca9229es/ca9229es.pdf>
- REYES, A., MARTÍNEZ, P., & AHMAD, R. (2020). Towards automated aquaponics: A review on monitoring, IoT, and smart systems. *J Cleaner Prod*, 263, 121571. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121571>
- RODRÍGUEZ, O. (2016). Diseño e implementación de un microsistema de cultivo acuapónico automatizado (trabajo de grado) Universidad de los Llanos. Repositorio Institucional. <https://repositorio.unillanos.edu.co/entities/publication/a6c48e67-d176-4aa0-b67d-05106436a74d>
- SHETE, A., VERMA, A., CHADHA, N., PRAKASH, C., CHANDRAKANT, M., & NUWANSI, K. (2017). Evaluation of different hydroponic media for mint (*Mentha arvensis*) with common carp (*Cyprinus carpio*) juveniles in an aquaponic system. *Aquaculture International*, 25(3), 1291–1301. <https://doi.org/10.1007/s10499-017-0114-5>
- SUMMERFELT, S., ZÜHLKE, A., KOLAREVIC, J., REITEN, B., SELSET, R., GUTIERREZ, X., & TERJESEN, B. (2015). Effects of alkalinity on ammonia removal, carbon dioxide stripping, and system pH in semi-commercial scale water recirculating aquaculture systems operated with moving bed bioreactors. *Aquacult Eng*, 65, 46–54. <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2014.11.002>
- VACA, S. (2023). Automatización, modelamiento y evaluación de un sistema acuapónico NFT para cultivo de Carpa Roja (*Cyprinus carpio*) y Lechuga Crespa (*Lactuca sativa*) (tesis de maestría) Universidad Nacional de Colombia. Repositorio Institucional UNAL. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/83734>
- VILLA, G., GIRALDO, B., ORREGO, M., DÍAZ, L., JARAMILLO, B., & GARCÍA, H. (2018). Evaluación comparativa de lechuga (*Lactuca sativa* L.) “Verónica” bajo condiciones controladas en dos métodos de producción. *Encuentro SENNOVA Del Oriente Antioqueño*, 4(1), 36–46. <https://revistas.sena.edu.co/index.php/Encuentro/article/view/2055>
- WORLD RENEW & DIACONIA NACIONAL (2020). Manual Técnico de Acuaponía experiencias en manejo de sistemas acuapónicos con enfoque de seguridad alimentaria. <https://es.scribd.com/document/721951031/Manual-Tecnico-de-Acuaponia>
- WORTMAN, S. (2015). Crop physiological response to nutrient solution electrical conductivity and pH in an ebb-and-flow hydroponic system. *Sci Hortic*, 194, 34–42. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0304423815301199>
- YILDIZ, H., ROBAINA, L., PIRHONEN, J., MENTE, E., DOMÍNGUEZ, D., & PARISI, G. (2017). Fish welfare in aquaponic systems: Its relation to water quality with an emphasis on feed and faeces – A review. *Water*, 9(1), Article 13. <https://doi.org/10.3390/w9010013>



# Efecto de la antigorita (silicato de magnesio) en el alivio de estrés por metales pesados

## Effect of antigorite (magnesium silicate) on the relief of heavy metal stress

Yefer Alexander Avellaneda<sup>1</sup>✉, Nathalia Gutiérrez Toro<sup>2</sup>✉

<sup>1</sup> I.A. Gerente Técnico - comercial, Agrosilicium SAS.

<sup>2</sup> I.A. Magíster en mercadeo.



Vol. 54 (1 y 2) de 2024 | pp: 23 - 30 | ISSN 0562-5351 E-ISSN 2665-6558 | REC.: 15/05/2025 - ACEP.: 10/10/2025

### RESUMEN

El incremento de metales pesados en el suelo es una gran limitante para la producción agrícola y un riesgo para la salud dada su bioacumulación; sin embargo, elementos benéficos como el silicio, han demostrado jugar un papel muy importante en el alivio de la fitotoxicidad causada por estos metales. Algunos mecanismos propuestos para aliviar el estrés con silicio (Si) incluyen la inmovilización de metales tóxicos en el suelo, la estimulación de antioxidantes enzimáticos y no enzimáticos, coprecipitación de metales, quelación de iones metálicos, compartimentación, alteraciones estructurales de la pared celular y alteraciones moleculares a nivel de la planta. En la presente revisión, se detalla el efecto potencial del silicio (Si) y el magnesio (Mg) y los mecanismos implicados en el alivio de la toxicidad causada por metales pesados, así como su efecto en conjunto. Además, se comparten algunos resultados obtenidos en la neutralización de cadmio, plomo y arsénico con la adición de silicato de magnesio en dosis crecientes, con lo cual se logra llevar a cero el valor de los metales en solución. También se muestra el impacto del uso de Antigorita sobre los metales pasados Plomo, Cromo, Arsénico y Cadmio en suelos y materiales orgánicos de uso en la agricultura, logrando un resultado similar al anterior trabajo.

**Palabras clave:** Silimagnum, fitotoxicidad, bioacumulación, cadmio, plomo, arsénico.

### ABSTRACT

The increase of heavy metals in the soil is a great limitation for agricultural production and a health risk given its bioaccumulation, however, beneficial elements such as silicon have been shown to play an important role in alleviating phytotoxicity caused by these metals. Some mechanisms proposed to relieve stress with silicon (Si) include the immobilization of heavy metals in the soil, the stimulation of enzymatic and non-enzymatic antioxidants, coprecipitation of metals, chelation of metal ions, compartmentation, structural alterations of the cell wall and molecular alterations at the level of the plant. In this review, the potential effect of silicon (Si) and magnesium (Mg) and the mechanisms involved in alleviating heavy metal toxicity are detailed, as well as their overall effect. In addition, some results obtained in the neutralization of cadmium, lead and arsenic with the addition of magnesium silicate in increasing doses to bring the value of metals in solution zero are shared.

**Keywords:** Silimagnum, phytotoxicity, bioaccumulation, cadmium, lead, arsenic.

## INTRODUCCIÓN

Durante las últimas décadas, la contaminación por metales pesados en el suelo y el agua ha aumentado particularmente en áreas con mayor presión antropogénica. La acumulación de metales pesados en el suelo es motivo de preocupación en la producción agrícola debido a los efectos adversos en la seguridad y comercialización de los alimentos, la salud de los organismos del suelo y la fitotoxicidad que genera en los cultivos afectando su crecimiento.

Sin embargo, estos “metales pesados” pueden clasificarse como micronutrientes que en cantidades mínimas, algunos, son esenciales para las plantas, como es el caso del cobre (Cu), zinc (Zn), hierro (Fe), manganeso (Mn), molibdeno (Mo), níquel (Ni), y cobalto (Co), involucrados en procesos fisiológicos y bioquímicos de la planta, principalmente en reacciones redox y componentes enzimáticos. Se dice que sólo cuando estos están presentes en formas biodisponibles y en niveles excesivos, tienen el potencial de volverse tóxicos (Nagajyoti, Lee & Sreekanth, 2010).

Los demás metales pesados se clasifican como no esenciales y potencialmente tóxicos, como por ejemplo, cadmio (Cd), mercurio (Hg), plomo (Pb), cromo (Cr), arsénico (As) y plata (Ag), significan un riesgo no solo para las plantas sino para los demás seres vivos ya que se incorporan en la cadena trófica (Bhat *et al.*, 2019; Kalaivanan & Ganeshamurthy, 2016).

Altas concentraciones de metales pesados alteran la absorción, acumulación y translocación de elementos esenciales en la planta (Zia-ur-Rehman, Sabir & Nadeem; 2015). Efectos tóxicos comunes causados por metales pesados incluyen la inhibición de crecimiento y fotosíntesis, baja acumulación

de biomasa, afectación de la asimilación de nutrientes y del balance hídrico, senescencia y finalmente la muerte de la planta (Ali *et al.*, 2011).

### **Efecto del silicio en la reducción de estrés por metales pesados**

Los efectos del silicio (Si) como elemento benéfico, han sido muy estudiados en el sistema suelo-planta. Algunos de los papeles más importantes que tiene el silicio en las plantas son la absorción y homeostasis de los nutrientes, y la reducción del estrés causado por algunos metales pesados presentes en el suelo (Liang *et al.*, 2005). Una de las propiedades de los silicatos en el suelo para reducir el estrés por la presencia de metales pesados es que pueden convertir fracciones solubles e intercambiables de metales en formas químicas estables, disminuyendo la biodisponibilidad del metal.

La adición de silicato al suelo promueve la polimerización de compuestos silicatados, conocidos como ligandos potenciales para metales pesados complejos (Dietzel, 2000; Sommer *et al.*, 2006). El alivio de la fitotoxicidad de metales pesados no es solo debido a la disminución de la biodisponibilidad de los metales en los suelos tratados con Si, sino que también depende de los efectos del Si dentro de la planta (Epstein, 1999; Liang *et al.*, 2007). De acuerdo con Bhat *et al.* (2019) los principales mecanismos de mejora del Si al estrés metálico incluyen: la inmovilización de metales tóxicos en el suelo, la estimulación de antioxidantes enzimáticos y no enzimáticos, coprecipitación de metales, quelación de iones metálicos, compartimentación, alteraciones estructurales de los tejidos vegetales y alteraciones moleculares a nivel de la planta.

**Inhibición de la translocación de metales desde las raíces a los brotes.** El Si afecta la translocación y distribución de metales

pesados en varias partes de la planta y les permite sobrevivir bajo mayor estrés. Se observó que el tratamiento con Si reduce el transporte de Zn desde las raíces a los brotes y aumenta la unión de Zn a la pared celular, disminuyendo así la concentración de Zn en los brotes de arroz (Yamaji, Mitatni & Ma, 2008). En trigo, la aplicación de Si también reduce la translocación de Cd de la raíz a los brotes y granos (Naeem, Ghafoor & Farooq; 2015), y en arroz, Shi *et al.* (2005) observaron una disminución del 33% en la translocación de Cd de la raíz a los brotes. Igualmente Zehra *et al.* (2020) demostraron en *A. annua* que el Si aplicado exógenamente aumentó la acumulación de Cu en los tejidos de las raíces conteniendo su translocación a los brotes, aliviando los efectos dañinos del exceso de Cu en las plantas afectadas y al mismo tiempo promoviendo el crecimiento y aumento de la producción.

**Estimulación de sistemas antioxidantes en plantas:** El sistema antioxidante enzimático y no enzimático estimulado por el Si ayuda a disminuir el estrés oxidativo al reducir la producción de especies reactivas de oxígeno (ROS). Varios estudios han demostrado una relación entre la aplicación de silicio y el alivio del estrés causado por Cd, Pb, Mn, Zn y Cu en cultivos como tomatillo, pepino, arroz y maíz (Shi *et al.*, 2005; Lukačová *et al.*, 2013; Jia-Wen *et al.*, 2013). Tripathi *et al.* (2013) también informan que el Si mejoró la tolerancia al As en algunos cultivares de arroz. La aplicación de Si remedió significativamente el estrés oxidativo inducido por As en un cultivar al limitar la absorción de As y mejorar los sistemas antioxidantes y tiólicos más que en otro cultivar. Aunque no está claro si es el resultado de una acción directa o indirecta del Si, lo cierto es que la aplicación de este elemento causa un aumento significativo de antioxidantes enzimáticos como la superóxido dismutasa (SOD), ascorbato peroxidasa y glutatión reductasa y no enzimáticos como

ascorbato y glutatión; reduciendo al mismo tiempo compuestos relacionados con el estrés oxidativo como el malondialdehído (MDA), Peróxido de Hidrógeno ( $H_2O_2$ ) y la fuga electrolítica (Li *et al.*, 2012; Song *et al.*, 2009; Shi *et al.*, 2005).

**Compartimentación de iones metálicos dentro de las plantas:** Liu *et al.* (2013) informan por primera vez que una forma de Si unida a la pared inhibe la absorción de iones de cadmio en las células de arroz posiblemente a través de la codeposición de Si y Cd en la pared celular como complejos de [matriz de pared de Si]-Cd. Un aumento en la densidad de carga negativa debido a la asociación de Si puede explicar por qué las plantas tratadas con Si tienen más deposición de Cd en la pared celular. El mismo estudio sugiere además que la inhibición de la absorción de cadmio por el Si unido a la pared está relacionada no solo con una mayor deposición de Cd en la pared celular, sino también con la baja expresión de genes transportadores de Cd como *Nramp5* (Ma *et al.*, 2015).

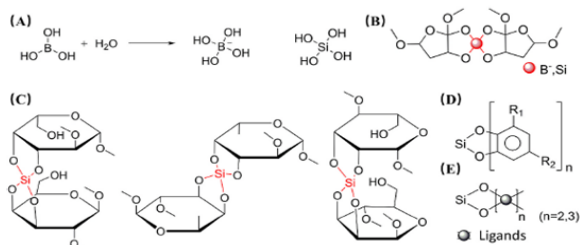
Bajo estrés prolongado por Cd, se encontró que las paredes celulares modificadas con Si reducen la toxicidad del Cd mediante la compartimentación del Cd en vacuolas para reducir los niveles de Cd en el citoplasma. También se observó que el silicio aumenta la localización de Mn en la pared celular en pepino (Dragišić *et al.*, 2012). Además, en plantas tratadas con Si, se localizó menos Mn en el simplasto (<10%) y se unió más Mn a la pared celular (> 90%) en comparación con las plantas control (Rogalla & Römheld, 2002).

Se han identificado complejos de Si en la pared celular de diferentes plantas. Los posibles ligandos de Si incluyen los de hemicelulosa, pectina y lignina (Figura 1) (Sheng & Chen, 2020). La asociación de ácido monosilícico en la pared celular de la planta puede conducir a la formación de enlaces Si – O – C, lo que lleva

a una mayor densidad de carga negativa en la pared y, por lo tanto, aumenta la unión de los iones metálicos libres a la pared. Esta mayor carga negativa, además, da como resultado un alivio de la toxicidad de los metales pesados y una mejora en la absorción de nutrientes (He *et al.*, 2015; Adrees *et al.*, 2015) (Figura 2).

De otro lado, el Si unido a la pared celular modula la síntesis y remodelación de la pared celular, lo que da como resultado una relativamente densa disposición de microfibrillas de celulosa y una pared celular reforzada contra el estrés biótico y abiótico (Sheng *et al.*, 2018). La remodelación de la pared celular inducida por Si también tiene efectos benéficos para mantener la integridad de la membrana plasmática y, además, mejora la tolerancia al estrés salino, así como a la homeostasis de nutrientes (Sheng *et al.*, 2018).

También es posible que la remodelación de la pared celular inducida por Si desencadena la señalización de la integridad de la pared celular y, por lo tanto, mejora el crecimiento de las plantas en condiciones de estrés (Engelsdorf *et al.*, 2018; Voxeur y Hofte, 2016). Dada la coexistencia de silicio orgánico y  $\text{SiO}_2$  inorgánico en las plantas, es un desafío distinguir los efectos de las dos sustancias químicas en el crecimiento de las plantas y las respuestas al estrés. (Głazowska *et al.*, 2018).



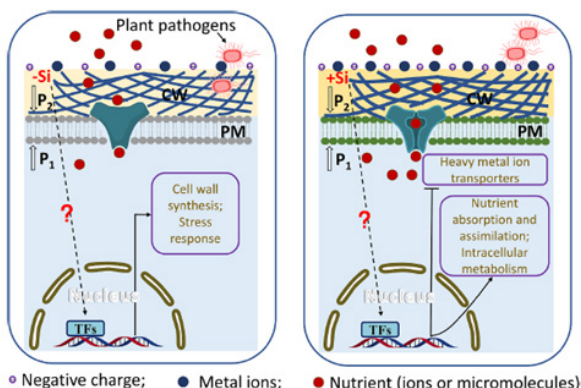
**Figura 1.** Posibles patrones de enlaces de Si en la pared celular (Tomada de Sheng & Chen, 2020)

En la figura 1 se describen los posibles patrones de vinculación del silicio a la pared de células de las plantas. (A) El ácido bórico se convierte en borato  $[\text{B}(\text{OH})_4]^-$  en soluciones a pH fisiológico. La similitud estructural implica la comparabilidad de productos químicos y las propiedades de Si y B. (B) Las reacciones de enlaces 1,3 residuos de apiosilo en ramnogalacturonano II (RG-II, pectina) con ácido bórico y ácido monosilícico (Kobayashi *et al.*, 1996; O'Neill *et al.*, 1996). (C) Complejamiento de hidroxilo entre  $\text{H}_4\text{SiO}_4$  y cis-dioles en hemicelulosas. Complejos de silicato / borato-azúcar están formados por la reacción de formosa en la Fig.1B y C. (D) Posible reticulación de Si y unidades fenólicas en ligninas (Birchall, 1995). (E) Si poli-coordinado en plantas. A diferencia del Boro, el Silicio puede formar hasta seis enlaces coordinados (Kinrade *et al.*, 1999).

En la figura 2 se ilustran distintas funciones de la matriz de silicio en la pared celular y su influencia en el crecimiento de las plantas en condiciones de estrés. Un posible mecanismo es que el silicio orgánico altera la estructura de la pared celular y por lo tanto sus propiedades mecánicas y potencial superficial. De esta manera, aumenta la densidad de carga negativa de la pared celular y, por lo tanto, la unión de iones metálicos en la pared (Ma *et al.*, 2015).

Las Paredes celulares relativamente rígidas proporcionan presión invertida (P2) para contrarrestar la turgencia celular (P1), que ayuda a mantener la integridad de la membrana plasmática (PM verde en las células  $\beta\text{Si}$ ) y evitar la despolarización (PM gris en células  $-\text{Si}$ ) (Sheng *et al.*, 2018).

La membrana plasmática estabilizada tiene efectos benéficos sobre los transportadores o canales de iones y, además induce tolerancia al estrés y homeostasis de iones y nutrientes.



**Figura 2.** Papel del Silicio en la formación de complejos en la pared celular de las plantas (Tomada de Sheng & Chen, 2020).

Los enlaces Si-O-C de la matriz de pared celular no son escindibles por las enzimas de degradación de la pared celular producidas por patógenos vegetales haciendo la pared resistente a la degradación durante la infección de patógenos (Schwarz, 1973).

Es posible que la remodelación de la pared celular inducida por el Si, coordina la señalización con la integridad de la pared celular para regular dinámicamente el crecimiento de las plantas y su desarrollo en respuesta a cambios ambientales, y da como resultado un alivio de la toxicidad de los metales pesados.

En conclusión se dice que el Si juega un papel importante para mejorar la resistencia al estrés causado por los metales pesados. Sin embargo, los mecanismos de alivio mediados por Si pueden estar correlacionados con las especies de plantas, el entorno de crecimiento, los metales pesados, los nutrientes minerales, el momento del estrés impuesto, entre otros factores.

### Efecto del Magnesio en la reducción de estrés por metales pesados

El magnesio considerado esencial para la planta, también puede aliviar el estrés por

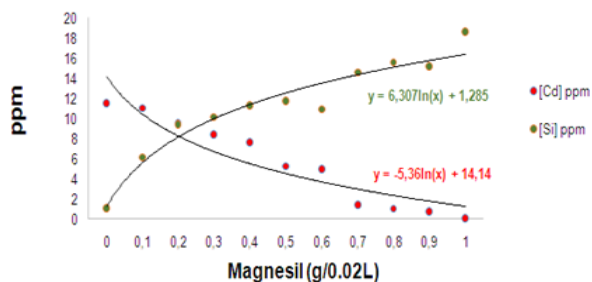
metales pesados al disminuir la actividad de los iones metálicos en la superficie de la membrana plasmática (competencia físico-química), al mejorar las actividades de las enzimas involucradas en la biosíntesis de ligandos orgánicos y al aumentar el secuestro vacuolar de metales pesados a través del aumento de la actividad de las bombas H<sup>+</sup> en el tonoplasto (Rengel *et al.*, 2016).

El magnesio mejora no solo la toxicidad del Al<sup>3+</sup>, sino también la toxicidad de otros metales. Se propuso el alivio de la fitotoxicidad de Cd por Mg<sup>2+</sup> en el caso de la espinaca de mostaza japonesa (*Brassica rapa* L. var. Perviridis) (Kashemand Kawai 2007), con la desviación de crecimiento resultante en un crecimiento de brotes ~ 2 veces mayor y una concentración de Cd 40% menor en los brotes. Pedler *et al.* (2004) demostraron el alivio por Mg<sup>2+</sup> de la rizotoxicidad del Zn en trigo y rábano.

### Efecto del Silicato de magnesio (SiliMagnum®) en la reducción de estrés por metales pesados

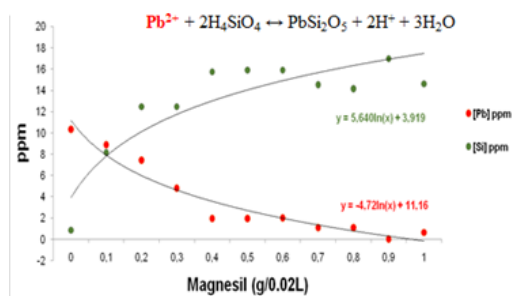
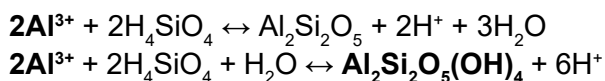
Con el propósito de contribuir al mejoramiento en la calidad de los abonos orgánicos que se utilizan en la agricultura, se desarrolló un trabajo de investigación en búsqueda de la neutralización de metales pesados en residuos orgánicos provenientes de la planta de depuración de aguas residuales urbanas, a partir de curvas de adición de silicato de magnesio, obtenidas al someter al abono a pruebas de incubación, buscando la neutralización de los metales pesados que contienen estos abonos.

Paralelamente se desarrollaron pruebas de neutralización de cadmio, plomo, y arsénico en soluciones acuosas preparadas en laboratorio, encontrando resultados altamente satisfactorios (Figuras 3, 4, 5 y 6) (Ríos & Cristancho, 2016).



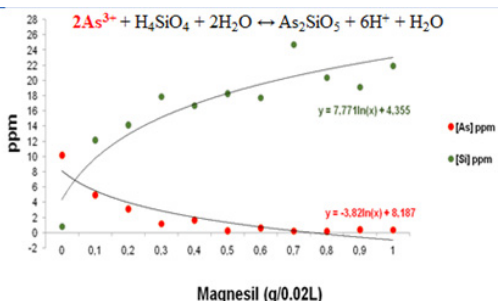
**Figura 3.** Efecto de dosis crecientes de SiliMagnum – Magnesil sobre Cadmio.

Las reacciones de formación de complejos con los metales pesados se asemejan a las que ocurren para acomplejar el aluminio del suelo:

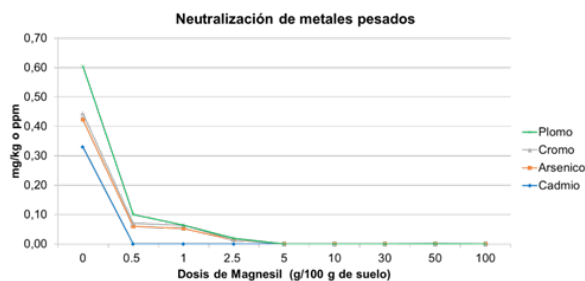


**Figura 4.** Efecto de dosis crecientes de SiliMagnum – Magnesil sobre Plomo

De tal manera que se cambia el reactivo de Al por el de Cd, Pb, As o el metal del que se trate, pues todos ellos son cationes metálicos (Osorio, 2014).



**Figura 5.** Efecto de dosis crecientes de SiliMagnum – Magnesil sobre Arsénico.



**Figura 6.** Efecto de dosis crecientes de SiliMagnum – Magnesil sobre metales pesados en suelos.

Las figuras 3, 4 y 5 muestran claramente el impacto que se logra con las aplicaciones de SiliMagnum® o Magnesil® en soluciones acuosas ricas en cada uno de los metales pesados. (Rios y Cristancho, 2016). La figura 6 es parte de un trabajo de investigación más amplio sobre la remediación de metales pesados en suelos y materiales orgánicos (Duque & Restrepo, 2018). Es difícil separar el efecto del silicio y el impacto que puede tener el magnesio en estas reducciones, pero es claro que ambos elementos contenidos en el producto comercial tienen la capacidad de reducir los efectos adversos que pueden tener los metales pesados, no sólo en la toxicidad de las plantas, sino en cortar sus efectos en la cadena alimenticia de animales y humanos que pueden estar comprometidos.

## BIBLIOGRAFIA

Ali, S., Bai, P., Zeng, F., Cai, S., Shamsi, I. H., Qiu, B., & Zhang, G. 2011. The ecotoxicological and interactive effects of chromium and aluminum on growth, oxidative damage and antioxidant enzymes on two barley genotypes differing in Al tolerance. *Environmental and Experimental Botany*, 70(2-3), 185-191.

Bhat, J. A., Shivaraj, S. M., Singh, P., Navadagi, D. B., Tripathi, D. K., Dash, P. K.,... & Deshmukh, R. 2019. Role of silicon in mitigation of heavy metal stresses in crop plants. *Plants*, 8(3), 71.

- Dragišić Maksimović, J., Mojović, M., Maksimović, V., Römheld, V., & Nikolic, M. 2012. Silicon ameliorates manganese toxicity in cucumber by decreasing hydroxyl radical accumulation in the leaf apoplast. *Journal of Experimental Botany*, 63(7), 2411-2420.
- Duque, C.; Restrepo, F. 2018. *Remediación de metales pesados en lodos de la planta San Fernando con dosis crecientes de SiliMagnum*. Sin publicar.
- Imtiaz, M., Mushtaq, M.A., Rizwan, M.S., Arif, M.S., Yousaf, B., Ashraf, M., Shuanglian, X., Rizwan, M., Mehmood, S., Tu, S., 2016. Comparison of antioxidant enzyme activities and DNA damage in chickpea (*Cicer arietinum* L.) genotypes exposed to vanadium. *Environ. Sci. Pollut.*
- Jia-Wen, W. U., Yu, S. H. I., Yong-Xing, Z. H. U., Yi-Chao, W. A. N. G., & Hai-Jun, G. O. N. G. 2013. Mechanisms of enhanced heavy metal tolerance in plants by silicon: a review. *Pedosphere*, 23(6), 815-825.
- Kalaivanan, D.; Ganeshamurthy, A.N. 2016. Mechanisms of heavy metal toxicity in plants. In *Abiotic Stress Physiology of Horticultural Crops*; Springer: Berlin, Germany, pp. 85–102.
- Liu, J., Zhang, H., Zhang, Y., & Chai, T. 2013. Silicon attenuates cadmium toxicity in *Solanum nigrum* L. by reducing cadmium uptake and oxidative stress. *Plant Physiology and Biochemistry*, 68, 1-7.
- Li, P., Song, A., Li, Z., Fan, F., & Liang, Y. 2012. Silicon ameliorates manganese toxicity by regulating manganese transport and antioxidant reactions in rice (*Oryza sativa* L.). *Plant and Soil*, 354(1-2), 407-419.
- Lukačová, Z., Švubová, R., Kohanová, J., & Lux, A. 2013. Silicon mitigates the Cd toxicity in maize in relation to cadmium translocation, cell distribution, antioxidant enzymes stimulation and enhanced endodermal apoplasmic barrier development. *Plant Growth Regulation*, 70(1), 89-103.
- Ma, J., Cai, H., He, C., Zhang, W., & Wang, L. 2015. A hemicellulose-bound form of silicon inhibits cadmium ion uptake in rice (*Oryza sativa*) cells. *New Phytologist*, 206(3), 1063-1074.
- Neumann, D., & Zur Nieden, U. 2001. Silicon and heavy metal tolerance of higher plants. *Phytochemistry*, 56(7), 685-692.
- Naeem, A., Ghafoor, A., & Farooq, M. 2015. Suppression of cadmium concentration in wheat grains by silicon is related to its application rate and cadmium accumulating abilities of cultivars. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 95(12), 2467-2472.
- Nagajyoti, P. C., Lee, K. D., & Sreekanth, T. V. M. 2010. Heavy metals, occurrence and toxicity for plants: a review. *Environmental chemistry letters*, 8(3), 199-216.
- Osorio, N. W. 2014. *Manejo de nutrientes en suelos del trópico*. Editorial Medellín, Colombia: L. Vieco SAS, 117-129.
- Rengel, Z., Bose, J., Chen, Q., & Tripathi, B. N. 2016. Magnesium alleviates plant toxicity of aluminium and heavy metals. *Crop and Pasture Science*, 66(12), 1298-1307.
- Rios, J.J. y Cristancho, A. 2016. *Efecto del Magnesil en la neutralización de metales pesados en solución*. Sin publicar.
- Rogalla, H., & Römheld, V. 2002. Role of leaf apoplast in silicon-mediated manganese tolerance of *Cucumis sativus* L. *Plant, Cell & Environment*, 25(4), 549-555.
- Shi, Q., Bao, Z., Zhu, Z., He, Y., Qian, Q., & Yu, J. 2005. Silicon-mediated alleviation of Mn toxicity in *Cucumis sativus* in relation to activities of superoxide dismutase and ascorbate peroxidase. *Phytochemistry*, 66(13), 1551-1559.

- Sheng, H. & Chen, S. 2020. Plant silicon-cell wall complexes: Identificación, model of covalent bond formation and biofunction. Elsevier *Plant Physiology and Biochemistry* 155 (2020) 13–19.
- Song, A., Li, Z., Zhang, J., Xue, G., Fan, F., & Liang, Y. 2009. Silicon-enhanced resistance to cadmium toxicity in *Brassica chinensis* L. is attributed to Si-suppressed cadmium uptake and transport and Si-enhanced antioxidant defense capacity. *Journal of Hazardous Materials*, 172(1), 74-83.
- Tripathi, P., Tripathi, R. D., Singh, R. P., Dwivedi, S., Goutam, D., Shri, M., ... & Chakrabarty, D. (2013). Silicon mediates arsenic tolerance in rice (*Oryza sativa* L.) through lowering of arsenic uptake and improved antioxidant defence system. *Ecological engineering*, 52, 96-103.
- Vieira Da Cunha, P. K., Araújo Do Nascimento, W. C., & Da Silva, J. A. 2008. Silicon alleviates the toxicity of cadmium and zinc for maize (*Zea mays* L.) grown on a contaminated soil. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 171(6), 849-853.
- Yamaji, N., Mitatni, N., & Ma, J. F. 2008. A transporter regulating silicon distribution in rice shoots. *The plant cell*, 20(5), 1381-1389.
- Zehra, A., Choudhary, S., Wani, K. I., Naeem, M., Khan, M. M. A., & Aftab, T. 2020. Silicon-mediated cellular resilience mechanisms against copper toxicity and glandular trichomes protection for augmented artemisinin biosynthesis in *Artemisia annua*. *Industrial Crops and Products*, 155, 112843.
- Zia-Ur-Rehman, M., Sabir, M., & Nadeem, M. 2015. Remediating cadmium-contaminated soils by growing grain crops using inorganic amendments. *Soil remediation and plants: Prospects and challenges*, 367-396.



# Estimación espacial de la humedad superficial del suelo mediante integración de datos satelitales y variables geoambientales en una cuenca tropical andina

## Spatial estimation of surface soil moisture through integration of satellite data and geoenvironmental variables in a tropical Andean basin

Doris Helena Serrano Amaya <sup>1</sup>✉

<sup>1</sup>Facultad de Ciencias Básicas, Departamento de Geografía y Medio Ambiente, Universidad de Córdoba (Colombia).



Vol. 54 (1 y 2) de 2024 | pp: 31 - 39 | ISSN 0562-5351 E-ISSN 2665-6558 | REC.: 25/02/2026- ACEP.: 24/03/2026

### RESUMEN

La humedad del suelo constituye una variable de gran relevancia en campos como la producción agrícola, el monitoreo de condiciones de sequía, la planificación del riego y la modelación climática. Si bien los sensores satelitales permiten obtener información a escala global, su resolución espacial resulta insuficiente para abordar problemáticas de carácter local. En este contexto, la presente investigación propuso un modelo estadístico multivariado capaz de vincular las mediciones de humedad superficial del suelo obtenidas en campo en la cuenca del río Quindío, Colombia con factores del entorno como la cobertura vegetal y las propiedades físicas del suelo. Los resultados indicaron que el índice de vegetación normalizado (NDVI), la temperatura del suelo y la fracción de arena constituyeron los predictores con mayor capacidad explicativa. Al integrar estos factores con imágenes SMAP\_L2 de distintas resoluciones espaciales (1, 3, 9 y 36 km), se lograron estimaciones con mayor resolución que las disponibles únicamente a partir de los productos satelitales. Los coeficientes de regresión se obtuvieron mediante el método de mínimos cuadrados parciales (PLS), y el análisis de varianza confirmó la significancia estadística de todos los modelos ajustados ( $p = 0.0$ ). El modelo construido con datos SMAP de 1 km alcanzó el mayor coeficiente de determinación ( $R^2 = 73\%$ ), seguido por el de 3 km ( $R^2 = 65\%$ ). Estos hallazgos respaldan la viabilidad de la técnica propuesta para estimar la humedad superficial del suelo a escala local, incorporando su variabilidad espacial y temporal.

**Palabras clave:** Humedad del suelo, asimilación de datos, SMAP, variabilidad espacial, regresión PLS.

### ABSTRACT

Soil moisture is a key variable in agricultural production, drought monitoring, irrigation planning, and climate modeling. Although satellite sensors provide global-scale information, their spatial resolution is often insufficient for local-scale analysis. In this study, a multivariate statistical model was developed to relate field-measured surface soil moisture in the Quindío River basin (Colombia) with environmental factors such as vegetation cover and soil physical properties. Results showed that the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), soil temperature, and sand fraction were the most explanatory predictors. By integrating these factors with SMAP\_L2 satellite imagery at different spatial resolutions (1, 3, 9, and 36 km), predictions with higher spatial resolution than those available from satellite products alone were obtained. Regression coefficients were estimated using the Partial Least Squares (PLS) method, and analysis of variance confirmed statistical significance for all fitted models ( $p = 0.0$ ). The model built with 1 km SMAP data achieved the highest coefficient of determination ( $R^2 = 73\%$ ), followed by the 3 km model ( $R^2 = 65\%$ ). These findings support the viability of the proposed technique for estimating surface soil moisture at the local scale, capturing its spatial and temporal variability.

**Keywords:** Soil moisture, data assimilation, SMAP, spatial variability, PLS regression.

## INTRODUCCIÓN

La humedad del suelo (HS) representa un componente esencial del ciclo hidrológico, toda vez que regula los flujos de energía entre la superficie terrestre y la atmósfera (Babaeian et al., 2019). Su comportamiento incide de manera directa en una amplia gama de procesos hidrológicos y agronómicos: la generación de escorrentía superficial, la evapotranspiración, el establecimiento y desarrollo de cultivos, las necesidades de irrigación, así como la anticipación de eventos extremos como inundaciones y sequías. De igual forma, la HS desempeña un papel central en procesos biogeoquímicos vinculados al movimiento de solutos en el suelo y, por ende, a la calidad de los recursos hídricos (Brocca et al., 2017; Wagner et al., 2007; Zhang y Zhou, 2016).

Para la adecuada gestión del agua a escalas locales y regionales, resulta indispensable contar con observaciones detalladas que reflejen la variabilidad espacial de la HS (Lakshmi, 2013). No obstante, su caracterización plantea importantes desafíos, dada su marcada heterogeneidad espacial, la cual responde a gradientes de precipitación, tipo de suelo, cobertura vegetal y atributos topográficos como la pendiente, la curvatura, el aspecto y la elevación (Famiglietti et al., 1999; Yu et al., 2001; Guo et al., 2020).

La teledetección satelital se ha consolidado como una herramienta poderosa para el monitoreo continuo de la HS a escala global. En particular, el satélite SMAP (Soil Moisture Active Passive), puesto en órbita en 2015 por la NASA, ofrece estimaciones de la HS integrando mediciones de temperatura de brillo en banda L (sensor pasivo) con datos de retrodispersión de radar (sensor activo) (Mohanty et al., 2017; Petropoulos et al., 2015). Sin embargo, las resoluciones espaciales propias de estos productos

resultan insuficientes para estudios locales, lo que ha impulsado el desarrollo de técnicas de mejoramiento o downscaling.

En este marco, la asimilación de datos emerge como una estrategia eficaz para integrar información proveniente de distintas fuentes y mejorar la resolución espacial de las estimaciones (Chan et al., 2016). Dentro de los métodos estadísticos aplicables a este propósito, la regresión por mínimos cuadrados parciales (PLS) destaca por su capacidad de manejar conjuntos de predictores con alta colinealidad, reduciendo su dimensionalidad mediante la extracción de componentes ortogonales. Esta característica confiere al PLS una notable robustez frente a la incertidumbre en las mediciones (Wold, 1974; Leone et al., 2012).

El presente estudio tuvo como objetivo construir un modelo estadístico que relacione la variabilidad de la HS superficial con factores ambientales relevantes y con diferentes resoluciones espaciales de datos satelitales. Con tal fin, se emplearon imágenes SMAP\_L2 de 1, 3, 9 y 36 km de resolución, en combinación con promedios de HS medidos en campo en nueve unidades de muestreo durante siete períodos. El modelo fue desarrollado mediante el método PLS con el algoritmo NIPALS (Nonlinear Iterative Partial Least Squares), con el objetivo de estimar los coeficientes de regresión no estandarizados y generar predicciones de la HS a escala local.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Área de estudio.

El área de estudio comprende la cuenca hidrográfica del río Quindío, localizada en la vertiente occidental de la cordillera Central de Colombia, entre las coordenadas 4° 20' 55" N - 75° 48' 04" W y 4° 42' 57" N - 75° 23' 0" W. La cuenca abarca una extensión de 688,85 km<sup>2</sup>, con cotas altitudinales que oscilan entre 1.079

y 4.794 m s. n. m. Su territorio comprende unidades de paisaje diversas: montaña, piedemonte, lomerío y valle (IGAC, 2013). Desde el punto de vista socioeconómico, la cuenca sustenta importantes actividades agropecuarias—entre ellas el cultivo de café, plátano, cítricos y yuca—, además de la ganadería lechera, las plantaciones forestales y el turismo de naturaleza (García-Reinoso et al., 2011). El régimen climático presenta dos períodos húmedos definidos (marzo-mayo y octubre-diciembre) y dos estaciones más secas en los trimestres intermedios. Las temperaturas medias fluctúan entre 17,9 y 22,1 °C, con los valores más bajos en los meses de octubre y noviembre (IGAC, 2013).

#### **Unidades de muestreo.**

Se definieron nueve unidades de muestreo a partir de criterios fisiográficos que aseguraran representatividad de las condiciones de cobertura, pendiente, curvatura superficial y textura del suelo en la cuenca. Su delimitación se realizó mediante la técnica de geometría de contorno convexo (Barber et al., 1996), y se calcularon sus centroides geométricos y superficies, las cuales variaron entre 1.038 m<sup>2</sup> (U6) y 13.572,98 m<sup>2</sup> (U10).

Las unidades U1 a U6 se ubicaron en el paisaje de montaña, con pendientes superiores al 12%, bajo coberturas de bosque natural, plantaciones, pastos y cultivos semipermanentes, sobre suelos derivados de materiales volcánicos, sedimentarios y depósitos aluviales. Las unidades U7 y U9 se localizaron en el piedemonte y lomerío, en relieves de abanicos disectados y colinas con pendientes del 12 al 25%, con predominio de pastos y cultivos sobre suelos formados a partir de anfíbolitas, esquistos y cenizas volcánicas. La unidad U10, en el valle de inundación, se caracterizó por pendientes suaves (3-7%), cobertura de guaduales y suelos de origen aluvial.

#### **Medición de la humedad del suelo en campo.**

Se recolectaron un total de 2.211 muestras de suelo a una profundidad de 0-5 cm en las nueve unidades de muestreo, distribuidas en siete períodos de evaluación. La humedad volumétrica ( $\theta$ ) se determinó a partir de análisis gravimétrico y medición de la densidad aparente del suelo ( $\rho$ ), siguiendo la metodología descrita por Gabriels y Lobo (2006).

Los valores de humedad volumétrica fueron promediados por período de evaluación y por unidad de muestreo mediante el promedio heroniano, que pondera la media aritmética y la media geométrica, siendo esta última menos susceptible a valores atípicos (Sykora, 2009). Este procedimiento permitió obtener 63 promedios heronianos representativos de las condiciones de humedad en cada unidad.

#### **Datos satelitales de humedad del suelo (SMAP).**

Se obtuvieron imágenes de los productos SMAP\_L2 en cuatro resoluciones espaciales—1, 3, 9 y 36 km— correspondientes a las fechas de cada período de evaluación, a través del portal Earthdata Search de la NASA. Para cada centroide de unidad de muestreo, se extrajeron los valores de humedad del suelo satelital (HSs), que posteriormente se incorporaron al proceso de modelación estadística.

#### **Variables ambientales asociadas a la variabilidad de la humedad del suelo.**

Con el propósito de caracterizar los factores que condicionan la dinámica y heterogeneidad de la HS, se incluyeron las siguientes covariables:

**Índices espectrales (Sentinel-2):** A partir de imágenes del sensor Sentinel-2 se calcularon el Índice de Vegetación Normalizado (NDVI), el Índice de Vegetación Mejorado (EVI) y el

Índice de Diferencia Normalizada de Agua (NDWI), los cuales reflejan la densidad y salud de la cubierta vegetal, así como el estado hídrico de la superficie.

**Precipitación (Pp):** Factor que regula el aporte de agua al suelo y la dinámica de la vegetación. Los datos correspondieron a registros diarios de estaciones climáticas ubicadas en la cuenca.

**Temperatura del suelo (Ts):** Variable que influye en el estado físico del agua almacenada en el suelo y en la intensidad de la evapotranspiración, medida en °C mediante sensores instalados a 0-5 cm de profundidad.

**Topografía:** La elevación (DEM), la pendiente y la curvatura del terreno fueron derivadas del Modelo Digital de Terreno (MDT) ALOS PALSAR de 12,5 m de resolución. Estas variables condicionan la redistribución del agua sobre el paisaje.

**Fracción de arena (A):** Determinada mediante el método del hidrómetro de Bouyoucos en 43 muestras de suelo recolectadas en campo. La textura del suelo controla la velocidad de infiltración y la capacidad de retención hídrica.

### Análisis estadístico

En primer lugar, se evaluó la asociación lineal entre la humedad del suelo en campo (HSc) y los valores satelitales (HSs) mediante el coeficiente de correlación de Pearson. Para establecer las relaciones entre las variables ambientales y la HSc, se empleó el análisis de correlación parcial, que permite cuantificar el grado de asociación lineal entre dos variables controlando el efecto de las demás. La selección de predictores se basó en la minimización de la colinealidad entre variables, evaluada mediante los coeficientes de correlación parcial.

El modelo estadístico fue construido mediante la regresión por mínimos cuadrados parciales (PLS), implementada con el algoritmo NIPALS. Este método estandariza las variables a media cero y desviación estándar unitaria, extrae

componentes latentes no correlacionados entre sí y posibilita la estimación de coeficientes de regresión robustos frente a la multicolinealidad. La partición de los datos asignó el 80% al conjunto de entrenamiento y el 20% restante a la validación del modelo. La capacidad predictiva del modelo ajustado se cuantificó mediante el coeficiente de determinación de predicción ( $R^2_{pred}$ ), calculado como:

$$R^2_{pred} = 1 - [\sum(y_i - \hat{y}_{pred,i})^2] / [\sum(y_i - \bar{y})^2]$$

Donde  $y_i$  son los valores observados,  $\hat{y}_{pred,i}$  los valores predichos sobre el conjunto de validación,  $\bar{y}$  la media de los valores observados y  $n$  el número de observaciones. Los resultados se evaluaron gráficamente mediante diagramas de dispersión de valores observados frente a predichos.

## RESULTADOS

### Correlaciones entre la humedad del suelo en campo y satelital

El análisis de correlación de Pearson entre la HSc y la HSs (Figura 2) mostró que las relaciones con los productos SMAP de 1, 3 y 36 km fueron estadísticamente significativas ( $p < 0,05$ ). La correlación más elevada, de signo negativo, se obtuvo con la imagen de 1 km de resolución ( $r = -0,5386$ ), mientras que la resolución de 9 km presentó la correlación más débil ( $r = 0,2188$ ). Los comportamientos similares observados entre las resoluciones de 1 y 3 km sugieren que ambos productos capturan patrones espaciales afines en la cuenca.

### Correlaciones parciales con variables ambientales

El análisis de correlación parcial (Figura 3) reveló que las variables NDVI, NDWI, temperatura del suelo (Ts), elevación (DEM), curvatura (Ct) y fracción de arena (A)

presentaron correlaciones estadísticamente significativas con la HSc ( $p < 0,05$ ). Se identificó alta colinealidad entre NDVI y EVI, así como entre Ts y DEM, por lo que cualquiera de los pares podría actuar como predictor equivalente. A continuación, se resumen las interpretaciones de los factores con mayor relevancia:

**NDVI:** La correlación negativa encontrada entre este índice y la HSc indica que las coberturas con mayor densidad foliar —como bosques y cultivos densos (U1 a U6)— favorecen tasas más elevadas de evapotranspiración, lo que reduce la humedad disponible en la superficie del suelo.

**EVI:** Presentó una correlación positiva baja y no significativa con la HSc. Su menor sensibilidad en condiciones de cobertura vegetal moderada limita su utilidad como predictor en la cuenca estudiada (Huete et al., 2002).

**NDWI:** La correlación positiva con la HSc refleja la capacidad de este índice para detectar contenido de agua superficial y en la vegetación. Su desempeño fue particularmente notable en unidades con alta retención hídrica (U2, U9), aunque disminuye en suelos arenosos de alta permeabilidad.

**Precipitación:** No mostró correlación significativa con la HSc, lo que podría atribuirse a la rápida infiltración en suelos arenosos y a la redistribución vertical del agua en el perfil del suelo, factores que atenúan el efecto inmediato de la lluvia sobre la humedad superficial (Famiglietti et al., 1998).

**Temperatura del suelo (Ts):** La relación negativa con la HS es coherente con el aumento de la evaporación superficial a mayores temperaturas. Las unidades en altitudes más bajas y cálidas (U7, U9) presentaron menor humedad superficial respecto a las unidades ubicadas en zonas más elevadas (U1, U2).

**DEM:** La correlación negativa con la HS en zonas altas refleja la mayor exposición al viento y la mayor escorrentía superficial que caracteriza estas áreas, los cuales aceleran la pérdida de agua del horizonte superficial.

**Pendiente:** No se encontró una relación significativa entre este factor y la HSc, lo que sugiere que la influencia de otros elementos, como la cobertura vegetal o la estructura del suelo, puede neutralizar el efecto de la inclinación del terreno sobre la retención hídrica.

**Curvatura del terreno:** Las zonas cóncavas (U6, U8) tendieron a acumular mayor humedad superficial, mientras que las convexas (U5) mostraron valores inferiores, en concordancia con la dinámica gravitacional del agua.

**Fracción de arena (A):** Presentó la correlación negativa más alta con la HSc ( $r = -0,5594$ ). En suelos con alto contenido de arena (U1, U9, U10), la baja capacidad de retención hídrica favorece la infiltración rápida hacia capas más profundas, reduciendo la humedad superficial disponible.

### Modelos de regresión y predicción de la humedad del suelo.

A partir del análisis de correlación parcial, se seleccionaron el NDVI, la temperatura del suelo (Ts) y la fracción de arena (A) como variables predictoras para modelar la HSc en función de cada resolución espacial de SMAP. Las ecuaciones de regresión ajustadas con el método PLS fueron las siguientes:

$$HS_{p1} = 0,5596 - 0,0701 \cdot NDVI + 0,00113 \cdot Ts - 0,00184 \cdot A - 0,1961 \cdot SMAP1$$

$$HS_{p3} = 0,5368 - 0,0927 \cdot NDVI + 0,00254 \cdot Ts - 0,00217 \cdot A - 0,03972 \cdot SMAP3$$

$$HS_{p9} = 0,1558 - 0,0973 \cdot NDVI + 0,00385 \cdot Ts - 0,00212 \cdot A + 1,9929 \cdot SMAP9$$

$$HS_{p36} = 0,3825 - 0,0743 \cdot NDVI + 0,00319 \cdot Ts - 0,00225 \cdot A + 0,7389 \cdot SMAP36$$

Todos los modelos resultaron estadísticamente significativos ( $p = 0,0$ ). El modelo construido con datos SMAP a 1 km de resolución alcanzó el mayor  $R^2$  (72,75%), seguido por el de 3 km ( $R^2 = 65,31\%$ ). El modelo basado en la resolución de 36 km ( $R^2 = 52,44\%$ ) superó en ajuste al de 9 km ( $R^2 = 40,24\%$ ), lo que sugiere que la integración espacial a mayor escala puede capturar patrones regionales que compensan la pérdida de detalle en el tamaño de píxel.

Los gráficos de dispersión evidencian que el modelo a 1 km presentó la distribución de puntos más cercana a la línea 1:1, lo que confirma su mayor precisión en la captura de la variabilidad espacial local. A medida que disminuye la resolución, la dispersión se incrementa y la capacidad predictiva se reduce, con excepción del modelo de 36 km, cuyo comportamiento más regular puede estar asociado al suavizado de la heterogeneidad espacial.

## DISCUSIÓN

Los resultados de esta investigación demuestran que la integración de datos satelitales SMAP\_L2 con variables ambientales derivadas de imágenes de mediana resolución y mediciones in situ permite estimar con mayor precisión la humedad superficial del suelo a escala local. El enfoque de asimilación de datos basado en regresión PLS produjo predicciones estadísticamente robustas, superando en resolución espacial a la ofrecida por los productos satelitales originales ( $R^2$  referencia = 54%).

Entre las variables ambientales evaluadas, la fracción de arena del suelo emergió como el predictor de mayor peso, con una correlación negativa fuerte ( $r = -0,5594$ ) con la HS superficial. Este comportamiento es consistente con la literatura especializada,

que señala que los suelos arenosos presentan una capacidad de retención hídrica reducida y tasas de infiltración más elevadas, lo que disminuye la humedad disponible en el horizonte superficial (Rawls et al., 2003). La incidencia de este factor fue particularmente notable en las unidades con suelos de textura gruesa (U1, U9, U10), que exhibieron los menores contenidos de HS. Este hallazgo tiene implicaciones directas para la gestión del riego, ya que los suelos arenosos requieren intervenciones más frecuentes para evitar el estrés hídrico de los cultivos.

La temperatura del suelo también mostró una asociación negativa significativa con la HS superficial, lo que refleja el efecto de la evaporación directa sobre el contenido hídrico de la capa superficial. Las unidades situadas en altitudes menores y con temperaturas más elevadas (U7, U9) registraron humedades superficiales menores, en tanto que las ubicadas en zonas más frías y altas (U1, U2) mostraron mayor retención de agua. Este patrón es coherente con los procesos de evapotranspiración reportados para regiones de montaña tropical (Seneviratne et al., 2011). El NDVI contribuyó al modelo con una correlación negativa, reflejando que las coberturas con mayor densidad vegetal generan mayores tasas de evapotranspiración y, por ende, reducen la humedad superficial (Jackson, 1997). Este comportamiento fue particularmente pronunciado en las unidades con vegetación más densa (U3-U6). Aunque el EVI es a menudo considerado superior al NDVI en condiciones de alta biomasa (Huete et al., 2002), su baja correlación con la HSc en este estudio sugiere que la variabilidad de la cobertura vegetal en la cuenca no es suficientemente intensa para diferenciarlo como predictor independiente.

La ausencia de correlaciones significativas para la precipitación, la pendiente y el EVI puede explicarse por la escala temporal

y espacial de análisis. A nivel local y en períodos cortos, la rápida infiltración en suelos arenosos y la redistribución del agua en el perfil del suelo atenúan el efecto inmediato de la lluvia sobre la humedad superficial, tal como han documentado estudios previos en cuencas con similar variabilidad pedológica (Famiglietti et al., 1998).

La resolución espacial de los datos SMAP tuvo una influencia determinante en el desempeño de los modelos. El modelo a 1 km demostró ser el más preciso para capturar la variabilidad local del paisaje, en tanto que la precisión disminuyó progresivamente con resoluciones más gruesas. El comportamiento atípico del modelo a 36 km —con mejor ajuste que el de 9 km— podría asociarse a la capacidad de las observaciones de menor resolución para representar patrones regionales de HS que resultan difusos a resoluciones intermedias (Crow et al., 2012).

Los resultados son consistentes con trabajos previos de Alemohammad et al. (2017) y Abbaszadeh et al. (2019), quienes documentaron el potencial de técnicas de downscaling estadístico para mejorar la resolución espacial de los productos SMAP. Más recientemente, Nativel et al. (2022) y Tao et al. (2024) han ampliado este enfoque mediante la integración de sensores ópticos y de radar con datos de campo, obteniendo mejoras adicionales en la precisión predictiva en entornos con alta variabilidad climática y de uso del suelo. Desde una perspectiva práctica, los modelos desarrollados ofrecen una herramienta útil para optimizar el manejo del riego en sistemas agrícolas de la región andina, especialmente en suelos arenosos o en condiciones térmicas desfavorables. Las limitaciones del estudio incluyen la dependencia de los productos SMAP disponibles y la ausencia de variables como la conductividad hidráulica, la materia orgánica del suelo y la actividad

biológica, cuya incorporación podría mejorar la representación de la dinámica hídrica superficial en trabajos futuros. La aplicación de técnicas de aprendizaje automático, como redes neuronales o modelos de ensamble, representa una vía prometedora para extender y fortalecer el enfoque propuesto en zonas con mayor diversidad climática.

## CONCLUSIONES

La investigación desarrolló una metodología robusta para la estimación espacial de la humedad superficial del suelo a escala local en la cuenca del río Quindío, sustentada en la integración de datos satelitales SMAP\_L2 con variables ambientales obtenidas en campo y mediante teledetección de mediana resolución. Los modelos de regresión PLS ajustados en las cuatro resoluciones espaciales demostraron capacidad estadística significativa para capturar la variabilidad de la HS, logrando predicciones con una resolución superior a la de los productos satelitales de origen.

Los principales factores predictores identificados fueron la fracción de arena, la temperatura del suelo y el NDVI, los cuales reflejan la interacción entre las propiedades físicas del suelo, las condiciones térmicas locales y la dinámica de la cubierta vegetal. El modelo basado en la resolución de 1 km de SMAP presentó el mayor coeficiente de determinación ( $R^2 = 72,75\%$ ), lo que confirma la ventaja de emplear datos de alta resolución para estudios locales en paisajes heterogéneos.

Los hallazgos tienen implicaciones aplicadas para la gestión sostenible del agua en sistemas agrícolas y naturales: el conocimiento detallado de la distribución espacial de la HS permite orientar decisiones de riego, gestión del suelo y conservación de recursos hídricos. La metodología propuesta es transferible a

otras cuencas con características similares y ofrece una base sólida para futuras investigaciones que incorporen técnicas de aprendizaje automático o conjuntos de datos de mayor densidad temporal.

## REFERENCIAS

Abbaszadeh, P., Moradkhani, H., & Zhan, X. (2019). Downscaling SMAP radiometer soil moisture over the CONUS using an ensemble learning method. *Water Resources Research*, 55(1), 324-344. <https://doi.org/10.1029/2018WR023354>

Alemohammad, S. H., Kolassa, J., Prigent, C., Aires, F., & Gentile, P. (2017). Statistical downscaling of remotely-sensed soil moisture. En *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)* (pp. 2511-2514). IEEE.

Babaeian, E., Sadeghi, M., Jones, S. B., Montzka, C., Vereecken, H., & Tuller, M. (2019). Ground, proximal, and satellite remote sensing of soil moisture. *Reviews of Geophysics*, 57(2), 530-616. <https://doi.org/10.1029/2018RG000618>

Barber, C. B., Dobkin, D. P., & Huhdanpaa, H. (1996). The quickhull algorithm for convex hulls. *ACM Transactions on Mathematical Software*, 22(4), 469-483. <https://doi.org/10.1145/235815.235821>

Brocca, L., Ciabatta, L., Massari, C., Camici, S., & Tarpanelli, A. (2017). Soil moisture for hydrological applications: Open questions and new opportunities. *Water*, 9(2), 140. <https://doi.org/10.3390/w9020140>

Chan, S. K., Bindlish, R., O'Neill, P. E., Njoku, E., Jackson, T., Colliander, A., & Yueh, S. (2016). Assessment of the SMAP passive soil moisture product. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 54(8), 4994- 5007.

Crow, W. T., Berg, A. A., Cosh, M. H., Loew, A., Mohanty, B. P., Panciera, R., & Walker, J. P. (2012). Upscaling sparse ground-based soil moisture observations for the validation of coarse-resolution satellite soil moisture products. *Reviews of Geophysics*, 50(2). <https://doi.org/10.1029/2011RG000372>

Famiglietti, J. S., Devereaux, J., Laymon, C., Tsegaye, T., Houser, P., Jackson, T., Graham, T., Rodell, M., & Van Oevelen, P. (1999). Ground-based investigation of soil moisture variability within remote sensing footprints during the SGP97 hydrology experiment. *Water Resources Research*, 35(6), 1839-1851.

Famiglietti, J. S., Rudnicki, J. W., & Rodell, M. (1998). Variability in surface moisture content along a hillslope transect: Rattlesnake Hill, Texas. *Journal of Hydrology*, 210(1-4), 259-281.

Gabriels, D., & Lobo, D. (2006). Métodos para determinar granulometría y densidad aparente del suelo. *Venesuelos*, 14(1), 37-48.

García-Reinoso, P. L., Monsalve-Durango, E. A., & Lozano-Sandoval, G. (2011). Análisis espacial y temporal del índice de escasez de agua en la cuenca del río Quindío. *Revista de Investigaciones Universidad del Quindío*, 22(1), 70-82.

Guo, X., Fu, Q., Hang, Y., Lu, H., Gao, F., & Si, J. (2020). Spatial variability of soil moisture in relation to land use types and topographic features on hillslopes in the black soil area of northeast China. *Sustainability*, 12(9), 3552. <https://doi.org/10.3390/su12093552>

Huete, A., Didan, K., Miura, T., Rodriguez, E. P., Gao, X., & Ferreira, L. G. (2002). Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. *Remote Sensing of Environment*, 83(1-2), 195- 213.

- IGAC - Instituto Geográfico Agustín Codazzi. (2013). Estudio semidetallado de suelos, Departamento del Quindío. Escala 1:25 000. Informe técnico.
- Jackson, T. J. (1997). Soil moisture estimation using special satellite microwave/imager satellite data over a grassland region. *Water Resources Research*, 33(6), 1475-1484.
- Lakshmi, V. (2013). Remote sensing of soil moisture. *ISRN Soil Science*, 2013, Article ID 424178. <https://doi.org/10.1155/2013/424178>
- Leone, A., Viscarra-Rossel, R., Amenta, P., & Buondonno, A. (2012). Prediction of soil properties with PLSR and vis-NIR spectroscopy: Application to Mediterranean soils from Southern Italy. *Current Analytical Chemistry*, 8(2), 283-299.
- Mohanty, B. P., Cosh, M. H., Lakshmi, V., & Montzka, C. (2017). Soil moisture remote sensing: State-of-the-science *Vadose Zone Journal*, 16(1), 1-9. <https://doi.org/10.2136/vzj2016.10.0105>
- Nativel, S., Ayari, E., Rodriguez-Fernandez, N., Baghdadi, N., Madelon, R., Albergel, C., & Zribi, M. (2022). Hybrid methodology using Sentinel-1/Sentinel-2 for soil moisture estimation. *Remote Sensing*, 14(10), 2434. <https://doi.org/10.3390/rs14102434>
- Petropoulos, G. P., Ireland, G., & Barrett, B. (2015). Surface soil moisture retrievals from remote sensing: Current status, products and future trends. *Physics and Chemistry of the Earth*, 83-84, 36-56.
- Rawls, W. J., Pachepsky, Y. A., Ritchie, J. C., Sobecki, T. M., & Bloodworth, H. (2003). Effect of soil organic carbon on soil water retention. *Geoderma*, 116(1-2), 61-76.
- Seneviratne, S. I., Corti, T., Davin, E. L., Hirschi, M., Jaeger, E. B., Lehner, I., Orlowsky, B., & Teuling, A. J. (2010). Investigating soil moisture–climate interactions in a changing climate: A review. *Earth-Science Reviews*, 99(3-4), 125-161. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2010.02.004>
- Sykora, S. (2009). Mathematical means and averages: Generalized Heronian means. *Stan's Library*. <https://doi.org/10.3247/SL3Math09.002>
- Tao, S., Zhang, X., Chen, J., Zhang, Z., Kang, X., Qi, W., & Gao, Y. (2024). Generating surface soil moisture at 30 m resolution in grape-growing areas based on stacked ensemble learning. *International Journal of Remote Sensing*, 45(16), 5385-5424.
- Wagner, W., Blöschl, G., Pampaloni, P., Calvet, J. C., Bizzarri, B., Wigneron, J. P., & Kerr, Y. (2007). Operational readiness of microwave remote sensing of soil moisture for hydrologic applications. *Nordic Hydrology*, 38(1), 1-20.
- Wold, H. (1974). Causal flows with latent variables: Partings of the ways in the light of NIPALS modelling. *European Economic Review*, 5(1), 67-86.
- Yu, Z., Carlson, T., Barron, E., & Schwartz, F. (2001). On evaluating the spatial temporal variation of soil moisture in the Susquehanna river basin. *Water Resources Research*, 37(5), 1313-1326.
- Zhang, D., & Zhou, G. (2016). Estimation of soil moisture from optical and thermal remote sensing: A review. *Sensors*, 16(8), 1308. <https://doi.org/10.3390/s16081308>



# Factores y mecanismos de formación de costras calcáreas estructurales en suelos

## Factors and mechanisms of structural calcareous crust formation in soils

Angela Pinzon Pinto<sup>1</sup>✉, Jorge Alberto Sánchez Espinosa<sup>2</sup>✉

<sup>1</sup> Lic. en Biología. Agróloga. Magister.

<sup>2</sup> Antropólogo. Agrólogo. Magister, PhD.



Vol. 54 (1 y 2) de 2024 | pp. 40 - 47 | ISSN 0562-5351 E-ISSN 2665-6558 | REC.: 25/02/2026 - ACEP.: 23/03/2026

### RESUMEN

La formación de una costra superficial en el suelo es un proceso dinámico; es el resultado de varios factores principalmente del tipo de suelo y sus propiedades físicas, químicas y mineralógicas, como también, características de la precipitación, manejo del suelo y uso de fertilizantes. Existen dos tipos fundamentales de costras: estructurales y sedimentarias, según su proceso de formación. Las costras estructurales: son aquellas cuya estructura es generada por el desplazamiento y redistribución vertical in situ de las partículas tras la destrucción de las propiedades de los agregados y de la reorganización de diversos componentes en el seno de esta. En muchas de las descripciones de las costras estructurales se han podido identificar uno o incluso más microhorizontes, que se han interpretado como niveles que permiten dilucidar procesos importantes para su formación. Los microhorizontes más frecuentemente descritos en esta investigación presentan niveles de 1-10 mm, con porosidad muy poco desarrollada y diámetro medio de poro inferior al del material subyacente. En la parte más superficial de una costra estructural se aprecia un nivel más fino "microhorizonte" de sellado superficial, de 0,02 a 0,1 mm, formado por rotura y posterior compactación de los agregados o por depositación directa a partir de materiales en suspensión. El objetivo de esta investigación es el de conocer los factores y mecanismos que ocasionan las costras estructurales en un suelo clasificado como Fluvaquenthic Endoaquolls, localizado en el Valle del Cauca, como también identificar la interrelación que hay entre las propiedades físicas, químicas y mineralógicas.

**Palabras clave:** Costras calcáreas, microhorizontes, estructuras, suelo, agregados.

### ABSTRACT

The formation of a crust surface on the soil is a dynamic process; it results from several factors, primarily the soil type and its physical, chemical, and mineralogical properties, as well as precipitation characteristics, soil management, and fertilizer use. There are two fundamental types of crusts: structural and sedimentary, based on their formation process. Structural crusts are those whose structure is generated by the displacement and in-situ vertical redistribution of particles after the destruction of aggregate properties and the reorganization of various components within the crust. In many descriptions of structural crusts, one or more microhorizons have been identified, which have been interpreted as layers that help elucidate important processes in their formation. The microhorizons most frequently described in this research are 1–10 mm thick, with very little porosity and a mean pore diameter smaller than of the underlying material. In the uppermost part of a structural crust, a finer layer, the "microhorizons" of surface sealing, ranging from 0.02 to 0.1 mm, is observed, this layer is formed by the fracturing and subsequent compaction of aggregates or by direct deposition from suspended materials. The objective of this research is to understand the factors and mechanisms that cause structural crusts in a soil classified as Fluvaquenthic Endoaquolls, located in the Valle del Cauca, as well as to identify the interrelationship between its physical, chemical, and mineralogical properties.

**Keywords:** Calcareous crusts, microhorizons, structures, soil, aggregates.

## INTRODUCCION

La formación de costras superficiales está muy presente en los suelos del mundo y Colombia no ha sido ajeno a este tipo de formaciones. Mullins (1987) propuso algunos factores y mecanismos de la formación del encostramiento y consideró dos tipos de costras: *estructurales* y *endurecidas*; constató que para que se formen dichas costras se necesita: que el humedecimiento del sistema moviliza parte o la totalidad del limo y la arcilla; durante las primeras etapas de secado del material movilizado es transportado detrás del menisco de agua para ocupar concavidades en la superficie de los granos de arena formando puentes anulares entre ellos. A medida que avanza el secado, a pesar de la entrada de aire en el suelo, el material movilizado permanece saturado hasta alcanzar un potencial muy bajo, en consecuencia, la contribución del potencial matricial al esfuerzo efectivo proporciona un componente principal de la resistencia del suelo. La formación de costras en todas sus formas implica la destrucción inicial de los agregados del suelo, por lo tanto, es importante revisar los materiales y factores que afectan las fuerzas que unen los agregados del suelo, estos se mantienen unidos principalmente por fuerzas electroquímicas que unen las partículas del mineral arcilloso (J Morin) La estabilidad de los agregados depende de: la disposición de las partículas reales del suelo y el tipo de mineral arcilloso de sus características electroquímicas y de la concentración eléctrica de la solución del suelo. Las costras del suelo son una preocupación para los agricultores puesto que: a) evitan que el agua se infiltre porque llenan el espacio del poro cerca de la superficie, b) las costras restringen la emergencia de las plántulas, c) reducen la difusión de oxígeno a las plántulas; la germinación depende de la difusión de oxígeno desde el aire a través del suelo, si las costras del suelo están húmedas, el oxígeno

se reduce hasta en un 50 por ciento; d) la reflectancia de una superficie con costra es mayor que la de una superficie sin costra, una mayor reflectancia da como resultado menos absorción de energía del sol, d) las costras aumentan la erosión eólica en aquellos suelos que tienen una cantidad apreciable de arena. La lluvia produce granos de arena limpios que no están unidos a la superficie del suelo, estos granos de arena limpios son sujetos al movimiento del aire a lo largo de la superficie lisa de la corteza. Adicionalmente incluimos la respiración del suelo debido a que está ligada a muchos aspectos entre ellas variaciones pedoclimáticas a la diversidad biológica a las propiedades como es la física, la química la mineralogía.

## MATERIALES Y MÉTODOS

**Zona de estudio.** El estudio se llevó a cabo en la zona rural del municipio de Obando departamento del Valle del Cauca, Colombia; geomorfológicamente corresponde al plano de inundación del río Cauca de carácter meándrico activo, específicamente en la cubeta de desborde, el material de origen es de aluviones moderadamente gruesos y finos, el suelo se clasifica como Fluvaquentic Endoaquolls, franca gruesa, isohipertermica. (Figura 1)

## METODOLOGÍA

Se colectaron muestras de la capa superficial de las costras del suelo con el fin de conocer sus propiedades físicas, químicas, mineralógicas y micromorfológicas, (Métodos del IGAC, 2016). Desde el punto físico, se analizó la textura por el método de la pipeta; la estabilidad de la estructura por el método de desleimiento (USDA, 1999), para la infiltración se utilizó el miniinfiltrómetro, los límites de Atterberg por el método de la cazuela de Casagrande y la compactación con el penetrómetro de bolsillo. En cuanto a las propiedades químicas se

midió el pH, la capacidad de intercambio catiónico (CIC) y cuantificación de las bases (métodos del laboratorio de suelos del IGAC). Para el estudio mineralógico se emplearon las técnicas de microscopía óptica y difracción de rayos-X, a fin de establecer la composición mineral de las arenas y las arcillas. Para la descripción micromorfológica se utilizaron los conceptos y términos técnicos descritos en el Handbook (1985). Las mediciones de respiración de las costras por el método de de Soil Field Test – Solvita, el cual consiste en tomar el suelo a una humedad cercana a la capacidad de campo se inserta la punta de la paleta en el suelo, se ajusta la tapa y se mantiene a una temperatura ambiente (apartado de la luz solar) durante 24 horas, después de este tiempo se compara el color de la paleta con la clave de colores de la prueba.



**Figura 1.** Costras del área de estudio (foto A. Pinzón)

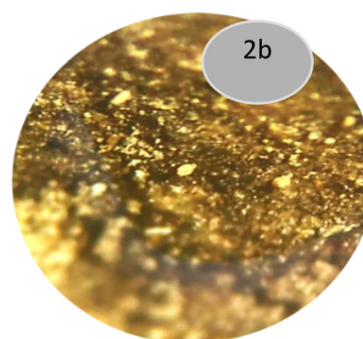
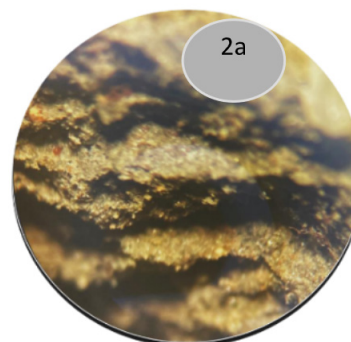
## RESULTADOS

Con el fin de determinar los procesos y mecanismos de la formación de la costra estructural en estudio, se discuten los efectos de las propiedades físicas, químicas y mineralógicas; y la relación que hay entre ellas en la formación de dicho proceso.

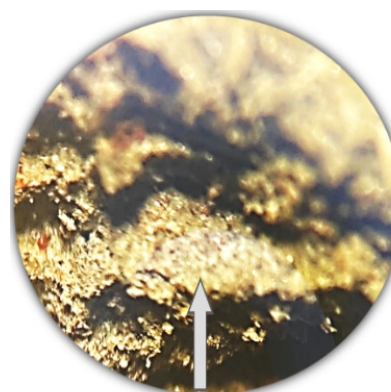
### Propiedades físicas:

**Textura:** franco-limosa. En el estereomicroscopio se observan tres

capas (fig. 2a) con diferente distribución de partículas. Una capa de arena suelta (fig.2b) que se superpone a una capa delgada de material más fina (Figura 3) con muy baja porosidad y es la que impide el movimiento del agua y restringe la entrada del aire.



**Figura 2a.** Microhorizontes de la costra estructural  
**Fig. 2b.** Capa de arena suelta muy fina vistas mediante el estereomicroscopio. (Fotos: Angela Pinzón)



**Figura 3.** Capa de arena que se superpone a una capa delgada de material más fina (Foto A. Pinzón)

**Estructura:** el desarrollo de las costras está muy relacionada con la estabilidad de los agregados; se considera que el alto porcentaje de limos es uno de los componentes desfavorables para generar agregados, por lo tanto, no hay un tipo de agregados que se puedan definir en estas costras. Las costras reducen notablemente la entrada del agua al suelo, debido a la baja porosidad, agotando su posible almacenamiento y e impidiendo la germinación de la semilla.

El control de la distribución de los tamaños de los agregados juega un papel muy importante en el proceso de formación de costras, agregados de menor tamaño originan poros muy pequeños favoreciendo su formación,

mientras que agregados más grandes son más resistentes a la degradación y originan un tamaño de poro mayor.

**Índice de plasticidad:** la prueba de Índice de Plasticidad (IP) es menor de 30, resultado muy bajo, lo cual indica la baja presencia de arcilla.

**Resistencia a la penetración:** La medición de resistencia a la penetración fue de 0.5 kg.cm<sup>-2</sup> es decir que la costra es muy frágil y se puede fragmentar fácilmente, al final dejan un suelo sobre la superficie sin estructura. La tabla 1 muestra las propiedades físicas realizadas a las costras.

Tabla 1. Propiedades físicas de la costra

Textura	Estabilidad estructural	Índice de plasticidad	Resistencia penetración kg.cm <sup>-2</sup>	Infiltración cm/t
FL	Muy baja	<30	0.5	0.001

**Infiltración:** para la infiltración se utilizaron dos métodos, uno mediante la prueba de penetración de gotas (WDPT, Water Drop Penetration Time), que consiste en cuantificar el tiempo que tarda en penetrar una gota de agua en una muestra de suelo: en la costra no penetró el agua. La segunda medición se hizo con el miniinfiltrómetro y el resultado fue de 0.001 cm en 10 minutos.

**Respiración:** de llevo a cabo mediante el método de Soil Field Test – Solvita y se comparó el color de la paleta introducida en el suelo (durante 24 horas) con la escala de respiración de la prueba; no se encontró cambio de color en la paleta, esto permite inferir que no hay actividad de edafofauna, fig. 4.



Figura 4. Equipo de Soil Field Test – Solvita (foto de: Angela Pinzón)

**Propiedades químicas:** los análisis químicos de la costra del suelo evidencian reacción básica, la capacidad de intercambio catiónico es media, las bases totales son medias, la saturación de bases es alta; los valores de calcio y magnesio son altos, mientras que sodio, potasio y fósforo son bajos; finalmente el carbono orgánico es muy bajo.

## MINERALOGÍA

Para el estudio mineralógico se emplearon las técnicas de microscopía óptica y difracción de rayos-X, a fin de establecer la composición mineral de las arenas y las arcillas respectivamente y determinar cuál es la especie o especies característica(s) de las costras.

**Mineralogía de arcillas:** los minerales más abundantes en las costras estudiadas se relacionan a continuación: clorita (14,0

Å – 7,1 Å), compuesta por capas alternas, mezcladas y ordenadas de diferentes tipos; esta es producto de la alteración de silicatos de Mg-Fe; los suelos en donde se presenta este mineral son susceptibles a la dispersión de arcilla.

Caolinita (7,21 Å – 3,58 Å) es también un mineral arcilloso abundante, cuya relación es 1:1, tetraedro-octaedro significa que se encuentra formada por láminas de tetraedros de silicio con fórmula  $Si_2O_3$  y de octaedros de aluminio con fórmula  $Al_2O_2(OH)_4$ . Tabla 2. Illita (10,0 Å – 5,0 Å) está presente, compuesta por tres capas, dos de Si-tetraedro y una central de octaedro no expandible, es una arcilla micácea diferenciándose por tener menos silicio sustituido por aluminio, más agua y la propiedad de fijar el potasio y el nitrógeno en forma de amonio en los suelos.

**Tabla 2.** Composición mineralógica de la fracción arcilla en relación con el análisis de difracción de rayos X.

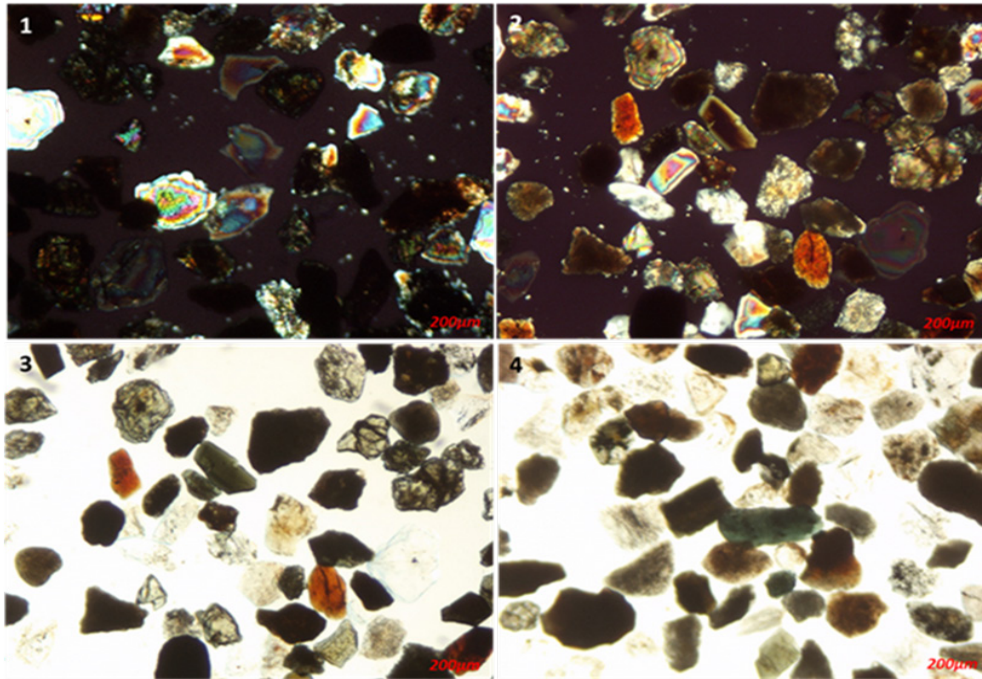
Clorita	Illita	Hornblenda	Caolinita	Cuarzo
'+++	'+	Tr	'+++	'+
'++++ Dominant (>50%); +++ Abundant (30-50%); ++ Common (15-30%); + Presence (5-15%); Tr: Traces (<5%).				

**Mineralogía de arenas:** la fracción arenosa está dominada por cuarzo subangular y subredondeado y se constituye en el mineral más abundante seguido por la hornblenda. Los granos alterados son especialmente cuarzo, biotita y hornblenda, y algunos productos ferruginosos. Los feldespatos son especialmente plagioclasa y feldespato

potásico, los minerales pesados son de circón, opacos y tienen tamaño y forma variable (redondeado e irregular) de color rojo amarillento en luz reflejada probablemente de hematita y se registra también la presencia de magnetita (Figura 5). Los fragmentos líticos son de origen ígneo metamórfico y se distribuyen de manera irregular sin sorteamiento. Tabla 3.

**Tabla 3.** Composición de la mineralogía de arenas

Qz	P	Hr	Op	GrA	Zr	B	He	Cl	Gr	Fp	Fl	Mt
25	6	16	12	9	3	5	3	3	Tr	4	8	6
Qz: quartz, P: piroxeno; Hr: hornblenda; Op: opacos; GrA: granos alterados; Zr: Zircon; B: biotita; He: hematita; Cl: clorita; Gr: granate; Fp: feldespatos; Fl: fragmentos líticos; Mt: magnetita.												



**Figura 5.** Microfotografías de las arenas 1 y 2 con NX (Foto Jorge Sánchez)

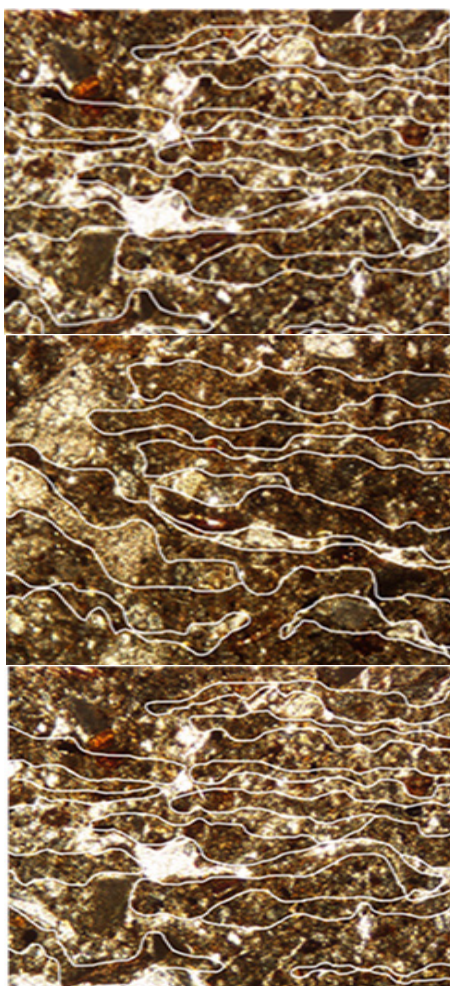
## MICROMORFOLOGÍA

El uso de la microscopía óptica permite analizar las características de la desagregación desde los primeros estadios y su evolución a lo largo del tiempo. Entre las características observadas, cabe destacar el desarrollo de microhorizontes por segregación de partículas de diferentes tamaños. La caracterización micromorfología de costras estructurales desarrolladas en suelos agrícolas del Valle del Cauca (Colombia) tienen la ventaja de que permiten visualizar y comprender los rasgos específicos del material de este tipo de costra. Las características de estas son las siguientes: espesor milimétrico, porosidad no conectada y muy escasa, caos de los agregados destruidos *in situ* por el impacto de las gotas de lluvia o del riego de alta intensidad en esta zona. Se ha establecido una relación directa entre la estabilidad de los agregados y la susceptibilidad del suelo a los cambios fuertes de humedad. Las observaciones con microscopio óptico en láminas delgadas de la muestra (fig. 5) permitieron diferenciar

con claridad discontinuidades; al menos tres capas o bandas que hemos denominado microhorizontes y en estos se aprecia con frecuencia una selección de granos de diferente tamaño.

El microhorizonte más próximo a la superficie (5) está formado por partículas relativamente grandes, con tamaños que oscilan aproximadamente entre 0.1 a 0.2mm., pueden alcanzar hasta 0.5mm a lo largo del eje mayor. Se aprecia cierta selección por diámetros de partículas frecuentemente angulares o subangulares, de modo que se diferencian de las bandas vecinas por la menor abundancia de materiales laminares. El segundo microhorizonte (6) es de un color un poco más oscuro que el primero, está formado por partículas de menor tamaño y mejor clasificadas que el microhorizonte de superficie. No se aprecia una zona de transición brusca con un límite claro entre las microestructuras; aunque está separada de la tercera por una capa de partículas similares en aspecto y tamaño a las de la

primera. El aspecto de las partículas de este microhorizonte a mayores aumentos (x121) se puede observar en dos microfotografías (fig. 6), apreciándose partículas con diferentes aspectos que contrastan entre sí, subredondeados y laminares se encuentran superpuestas unas a otras; el contraste es mayor dado que las formas laminares tienden a presentar una orientación preferencial. Por tanto, el segundo microhorizonte se presenta como una formación aproximadamente simétrica. El tercer microhorizonte (7) es de color más oscuro, se puede atribuir a que el plasma es más abundante en él y no alcanzó a ser afectado por el agua.



**Figura 6.** Microfotografías de secciones delgadas con microestructura laminar con NP y aumento 5X.

Al observar la costra en conjunto, se aprecian discontinuidades y oscilaciones en cuanto al tamaño de grano y la distribución granulométrica, que deben estar relacionadas con los episodios de precipitación y riego, y con las características del suelo, especialmente con la estabilidad de la estructura, el uso y el manejo del suelo.

## CONCLUSIONES

La revisión bibliográfica realizada ha puesto de manifiesto que se pueden utilizar criterios morfológicos sencillos para caracterizar diversos tipos de costras formadas en la superficie del suelo. Entre los principales criterios considerados se incluye la porosidad (abundancia y tipo) y la orientación y distribución de partículas gruesas y elementos finos. La identificación del tipo y grado de superficies encostradas y del estudio de degradación del suelo asociado al mismo proporciona información de primer orden para predecir la evolución de la infiltrabilidad del suelo y la susceptibilidad a la erosión. La descripción morfológica de microhorizontes también es posible utilizando las técnicas habituales en microscopía óptica y electrónica de barrido, en ellas, se pueden distinguir diferentes tipos de costras y analizar la relación con las condiciones edáficas y medioambientales, así como la interacción entre la dinámica de la evolución de los diferentes tipos descritos, como también fenómenos como la desagregación, la infiltrabilidad, inhibición de la entrada del agua al suelo por la ausencia de macro y mesoporos y una muy baja microporosidad, restricción de la emergencia de las plántulas, aumento de la erosión eólica o hídrica, reducción de la edafofauna del suelo, disminución de la difusión del oxígeno a las plantas, y una ausencia de respiración del suelo, proceso del suelo esencial para la edafofauna, a la cual se le ha dado muy poca importancia.

Sin duda, el único método recomendable contra la formación de costras es el mantenimiento de una buena estructura del suelo, esto requiere mantener un nivel adecuado de materia orgánica y un laboreo apropiado, de acuerdo con los requerimientos de cultivo, con las herramientas y con la maquinaria adaptada al tipo de suelo. La intensidad y la energía cinética del riego, especialmente por aspersión, pueden causar encostramiento del suelo.

## BIBLIOGRAFÍA

ANGULO, J.R. 2020. Protección del suelo frente a dos fenómenos físicos que reducen su calidad estructural. *Fitoser Agro*

BRESSON, L. M. and CADOT, L. 1992. Illuviation and structural crust formation on loamy temperate soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*

BULLOCK, P.; FEDOROFF, N; JONGERIUS, A. 1985. Handbook for soil thin section description. Prepared under the auspices of the International Society of Soil Science.

CHAMIZO, S. et al. 2010. Características de las costras físicas y biológicas del suelo con mayor influencia sobre la infiltración y la erosión en ecosistemas semiáridos. *Revista de Ecología de Montaña*, Vol. 165, 69-96

CHEN, J., J, TARCHITZKY, J. MORIN, A, BANIN, 1980. Scanning electron microscope observations on soil crust and their formation. *Soil Sci*,

CONCONSTRINA, Z; I MARTINEZ; HUBERS, A. ESCUDERO. 2013. Efectos y respuestas de la costra biológica del suelo en ecosistemas áridos. *Revista de ecosistemas y medio ambiente*.

FAO. Boletín número 9 de La FAO. Encostramiento del suelo

FITOSER AGRO. 2020. Sellado y encostramiento del suelo.

IGAC 2016. Métodos Analíticos de laboratorio.

MARTINEZ, M.A; P, M, Walthall. 2000. Cambios morfológicos durante el encostramiento de la superficie en suelos de México y Louisiana. *Terra Latinoamericana*

MORIN, J. 2009. Boletín de la FAO No.9.

MUALEM, Y., ASSOULINE, S. and ROHDENBURG, R. H. 1990. Rainfall induced soil sea! (A) *A Catena*, 17.

PINZON, A. 2006. Apuntes sobre física de suelos. 206 págs.

PINZÓN, A. 2020. Apuntes sobre física de suelos II. 123 págs.

PINZON, A; A. Muñoz 2022, Estimación de la tasa de respiración del suelo en tres cultivos en Funza

SÁNCHEZ, J.A. 2022. Mineralogía y micromorfología de suelos, conceptos y aplicaciones. Primera Edición. Bogotá, Colombia.

TABOADA, C. M. Genesis y clasificación de costras superficiales en suelos de cultivo. Universidad de A, Coruña.

USDA, 1999. Natural Resources Conservation Service.



# Efecto del fertirriego bajo diferentes láminas de agua (kc) y mulch plástico, en el rendimiento y calidad de fresa (*Fragaria x ananassa* Duch) var. Albión

## Effect of fertigation under different water depths (kc) and plastic mulch, on the yield and quality of strawberry (*Fragaria x ananassa* Duch) var. Albion 1.

Karen Stephanie Lucena Riascos<sup>2✉</sup>, Roberto García-Criollo<sup>2✉</sup>, Dario Fernando Fajardo Fajardo<sup>2✉</sup>

<sup>1</sup>Financiada por la vicerrectoría de Investigación e Interacción social (VIIS), [secretariaviis@udenar.edu.co](mailto:secretariaviis@udenar.edu.co)

<sup>2</sup>Ingeniera Agrónoma, FACIA, UDENAR

<sup>2</sup>Ingeniero en Producción Acuícola, FACIPEC, UDENAR

<sup>2</sup>Ingeniero en Electrónica, FACING, UDENAR



Vol. 54 (1 y 2) de 2024 | pp: 48 - 56 | ISSN 0562-5351 E-ISSN 2665-6558 | REC.: 25/03/2026 - ACEP.: 10/04/2026

### RESUMEN

La investigación se llevó a cabo en la Granja Experimental Botana de la Universidad de Nariño, evaluando el un sistema de fertirriego con tres láminas de agua (Kc: 0.5, 0.7 y 0.9) combinado con tres tipos de coberturas plásticas, negra (CN), plateada (CP) y transparente (CT); Bajo un sistema automatizado con sensores de humedad del suelo. Las variables evaluadas fueron el rendimiento del cultivo y calidad del cultivo de fresa, bajo diferentes ambientes edáficos evaluados. Empleando en el estudio un diseño experimental de bloques completos al azar, con un arreglo de franjas divididas; en este el modelo, el factor uno correspondió a los tres coeficientes de cultivo, mientras que el factor dos correspondió a la distribución de los tres tipos de coberturas plásticas. Las variables analizadas fueron; el rendimiento t. ha<sup>-1</sup>, y la calidad de fruto en estado de madurez (SST) Estado de Madurez 3 y 5; dentro de los nueve tratamientos evaluados. Los resultados mostraron que en cuanto al rendimiento (RTO) de fresa (*Fragaria x ananassa* Duch) var. Albión; existió influencia marcante por parte de las diferentes láminas de agua (Kc) y los mulch plásticos utilizados, donde el mayor valor se obtuvo con la interacción de cobertura negra (CN) con la lámina (Kc 0.7), (Kc) con un valor de 92,02 tha<sup>-1</sup>, seguida del Kc (0,90) con una media de 79,06 tha<sup>-1</sup> y el valor más bajo se obtuvo con Kc (0,50) con una media de 66,08 tha<sup>-1</sup>. En cuanto a la calidad del cultivo el plástico transparente con lamina (Kc 0,9) fue el de mejor desempeño con 10,03 °Brix.

**Palabras clave:** sistemas, cultivo, coeficientes, ambientes.

### ABSTRAC

This research was conducted at the Botana Experimental Farm of the University of Nariño to evaluate an automated fertigation system using soil moisture sensors. The study tested three water depths based on crop coefficients (Kc: 0.5, 0.7, and 0.9) combined with three types of plastic mulch: black (BN), silver (SN), and transparent (TN). A randomized complete block design with a split-strip arrangement was used to analyze crop yield (t) and fruit quality (Total Soluble Solids - TSS) at maturity stages 3 and 5. The results for the Albion strawberry variety (*Fragaria x ananassa* Duch) showed a significant influence from both the water depths and the plastic mulches. The highest yield was achieved with the interaction of black mulch and a Kc of 0.7, reaching 92.02, followed by Kc 0.9 (79.06) and Kc 0.5 (66.08). Regarding fruit quality, the transparent mulch with Kc 0.9 performed best, reaching 10.03 °Brix

**Key words:** system, Crop, coefficients, environments.

## INTRODUCCIÓN

El departamento de Nariño presenta un rendimiento bajo del cultivo de fresa (*Fragaria x ananassa Duch*) que en promedio está en 4,79 t/ha. Minagricultura, (2023), además los cultivos con riego son operados de forma manual y no son eficientes, ello limita suministro de agua adecuado para el cultivo de fresa (Salinas, 2018); debido a que cultivo tiene un sistema radicular poco profundo, una alta área foliar y un gran contenido de agua en la fruta, con lo cual el aporte de grandes cantidades de agua durante todo el ciclo de producción (Ariza et al., 2021). Sin embargo, el uso inadecuado del recurso hídrico en países latinoamericanos como Colombia, compromete la sostenibilidad ambiental y la viabilidad económica del sistema (Mohamed et al., 2020). Unido a lo anterior se dispone de muy poca información precisa para el manejo del cultivo de fresa en la amplia gama de suelos de ladera donde se cultiva, que permita eficientizar su manejo desde el punto de la relación Agua-Suelo-Planta-Atmósfera, que permita potenciar la competitividad y la economía a escala regional y nacional siguiendo lo propuesto por Moreno-Ortega et al., (2019); y Ariza et al., (2021). En virtud de lo anterior los sistemas de producción de fresa con inclusión de tecnologías de última generación, la utilización de acolchados (mulch) de plástico y diferentes láminas de agua (Kc), son alternativas de cultivo que influyen positivamente en la productividad del cultivo según lo exponen autores como (Allen et al, 2006) quien afirma que la variación de la curva del coeficiente del cultivo (Kc), correspondientes a la etapa de crecimiento, floración y producción. Influye en la fenología y fisiología del cultivo de fresa, además, estudios realizados por la FAO (2023) afirman que cada cultivo tiene sus propias características y necesidades en torno a su uso consuntivo y que está directamente ligado al tipo de condiciones edafoclimáticas y

fenología del cultivo. Lo cual se demuestra por lo expresado por Doorenbos & Pruitt, (2005) quienes reportan para el cultivo de fresa los siguientes valores de Kc: estados iniciales de 0,4 a 0,5; desarrollo vegetativo de 0,7 a 0,8; estado medio de desarrollo de 1,05 a 1,2; estado tardío de desarrollo de 0,85 a 0,95; estado de maduración de 0,7 a 0,75; valores que influyen directamente en la productividad y calidad del cultivo. Con base en lo anterior es necesario monitorear el agua del suelo y para ello los sensores de humedad son una alternativa que según Solem (2025), son implementos de medición de humedad del suelo, que utilizan diferentes tecnologías como capacitancia (TDR/FDR) o de resistencia para obtener datos de necesidades de agua luego de su transformación y lograr precisión en la automatización de los riegos, dentro de la gama de sensores el autor manifiesta que el sensor de humedad del 10HS Soil Moisture Sensor de METER Group, es un dispositivo de alta frecuencia (70 MHz) que mide el contenido volumétrico de agua (VWC), en el suelo usando tecnología dieléctrica (capacitiva), además manifiestan que estos sensores tienen alta capacidad de medir un alto volumen del suelo (1 L), capacidad que ayuda a evaluar con mayor precisión los valores de humedad del suelo en su natural heterogeneidad. Con base en los anteriores planteamientos el objetivo de la presente investigación fue implementar un cultivo de fresa bajo invernadero con un sistema de fertirriego automatizado, evaluando tres láminas de riego correspondiente a los coeficientes de cultivo (Kc: 0.5, 0.7, 0.9), en interacción con tres tipos mulch plástico (negro (CN), gris (CG), transparente (CT)), sobre el rendimiento y calidad del sistema de cultivo de (*Fragaria x ananassa Duch*) var. Albión; utilizando sensores de humedad 10HS Soil Moisture Sensor, una estación climática y la energía fotovoltaica como fuente para mantener todo el sistema de evaluación bajo invernadero.

## MATERIALES Y MÉTODOS

**Localización y muestreo de suelos.** La investigación se llevó a cabo en la granja experimental Botana de la Universidad de Nariño, en un suelo (*Vitric Haplustand*) bajo invernadero. Para la programación del plan de fertilización en el cultivo de fresa y la determinación de las diferentes láminas de agua, se realizó un muestreo de suelo en la capa productiva (Ap:0,20 m) cuyos resultados están expresados en las siguientes tablas 1 y 2.

**Tabla 1.** Análisis químico y físico de suelo.

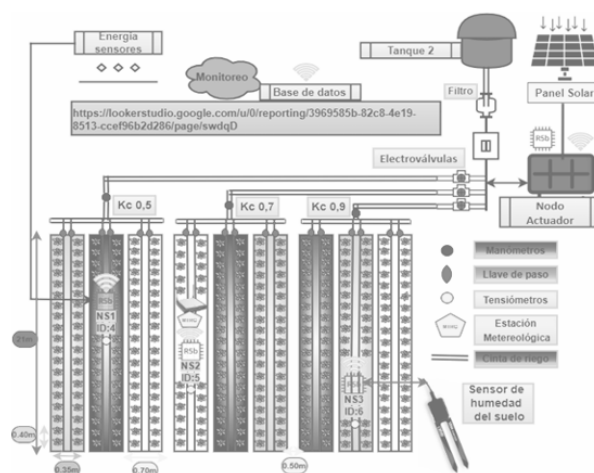
Parámetro	Unidad Medida	Nível
pH	5,5	Fuert. Acido
M.O	7,67 %	Medio
P	74,2 mg/kg	Alto
K	2,02 cmolc/kg	Alto
C	11,4 cmolc/kg	Alto
Mg	7,7 cmolc/kg	Alto
CIC	21,2 cmolc/kg	Alto
Fe	77,57 mg/kg	Medio
Cu	2,14 mg/kg	Medio
Mn	6,05 mg/kg	Medio
Zn	5,12 mg/kg	Medio
D.apar.	1,10kg/dm <sup>3</sup>	Medio
Textura	Ar.	

**Tabla 2.** Curva característica de agua del suelo del área experimental.

COL.AGUA cm	PF	U %	$\theta_v$ cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup>
0		65,36	71,80
25	1,398	62,45	68,70
75	1,875	59,85	65,83
300	2,477	39,25	43,18
15000	4,176	20,20	22,22

**Sistema de riego automatizado de fertirriego:** El sistema de fertirriego estuvo compuesto de tres subsistemas fundamentales, definidos como; fuente de agua, cabezal de riego, la red de distribución,

las derivaciones, los emisores y todos los elementos de control. La fuente de agua se suministró de la red de distribución de la granja, proveniente del reservorio de agua y que llegó por gravedad hasta el invernadero, el cabezal de riego permitió el control y filtrado del agua, la capacidad de adicionar fertilizantes y regular la presión del líquido, se destaca la unidad de filtrado que buscó eliminar partículas o sólidos en suspensión para no obstruir la red de distribución (figura 1).



**Figura 1.** Mapa de campo, detalles de distribución de tratamientos y detalles de la fertirrigación

Para obtener la información en el suelo, estuvieron colocados los sensores de humedad o nodos sensores 10HS Soil Moisture (Metergroup, 2025), que capturaron la información referente a la humedad de suelo en cada zona, mientras el nodo actuador ejecutó el algoritmo de control para activación de las electroválvulas de riego. En el cultivo de fresa en franjas, se instalaron tres sensores de humedad, equidistantemente, que por la pendiente del terreno (10%) se ubicaron en la zona alta, media y baja del ensayo, coincidente con las repeticiones del ensayo (R:1,2 y 3) (fig. 1), que estuvieran los sitios ligados a un determinado mulch plástico, de tal manera que cada sensor quedara ubicado en un bancal con diferente cobertura (gris, negro, transparente), buscando la mayor variabilidad

posible entre repeticiones. De esta manera el nodo sensor recolectó la información de estos sensores que fue enviada a través de un protocolo de comunicación al sistema de información central, donde estuvo disponible en tiempo real y se realizó la consulta por los usuarios desde cualquier dispositivo con una conexión a internet (Castro & Chamorro, 2016). La energía del todo el sistema de fertirriego fue entregado por una fotovoltaica, con una generación de hasta 18 Wh (vatios-hora), almacenada en una batería de 12 amperios – hora a 12V, energía liberada cuando la radiación no fue suficiente, compensando los faltantes de energía. Con base en los procesos anteriormente descritos y como el interés de la investigación fue trabajar con los sensores de humedad del suelo 10HS Soil Moisture Sensor; se procedió a calibrar las necesidades de agua calculadas de acuerdo a las metodologías propuestas por el fabricante Metergroup (2025), además para ajustar la precisión de las determinaciones se procedió a el ajuste de los sensores de humedad en campo con la metodología propuesta por Castro & Chamorro (2016); desarrollando las ecuaciones respectivas para determinar los contenidos de humedad, con los volúmenes, umbrales y nivel de agotamiento en el riego Montenegro et. al, (1990), para los coeficientes de estudio (Kc 0,9; 0,7; 0,5), obteniendo las variaciones de humedad del suelo y la programación permanente de la apertura y cierre de los solenoides en el sistema, de acuerdo con las láminas de agua programadas.

**Prácticas culturales en el cultivo de fresa y variables evaluadas:** La siembra del cultivo de fresa se realizó mediante estolones de plantas certificadas provenientes de la variedad Albión, sembrados a una distancia de 0,40 m entre plantas y 0,30 m entre hileras, obteniendo 53 plantas/hilera, 106 plantas/franja (kc), para un total de plantas por “mulch plástico” y por los tres coeficientes de cultivo

de 318 plantas y un gran total plantado en la investigación de 954 plantas de fresa (Figura 1). Además, se aplicaron todas las BPA durante todo el ciclo de cultivo, sobre todo en los 90 días de evaluación continua bajo las tres láminas de agua (Kc 0,5, 0,7 y 0.9) y las coberturas plásticas (Negra (CN), Gris (CG) y Transparente (CT)). La fertilización se realizó teniendo en cuenta el resultado del análisis de suelos (tabla 1) y los requerimientos nutricionales del cultivo de fresa; el plan de fertilización fue calculado por el criterio de absorción, con base en los propuesto por Castro & Gómez (2010), correspondiente a 18 k/ha N - 5 k/ha P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> – 8 k/ha K<sub>2</sub>O, aplicando la fertilización de base a los 30 días después de la siembra de los estolones, donde se aplicó el 30% del total del plan de fertilización en forma edáfica como fertilización de fondo; el 70% del resto de la fertilización fue aplicada en el transcurso del ciclo vegetativo del cultivo, por el sistema de fertirriego del cultivo en porcentuales de requerimiento.

**Variables agronómicas y de agua evaluadas:** Se realizaron 10 evaluaciones en 90 días de investigación sistemática, se procedió a evaluar a partir del tamaño de muestra estadística que fueron 12 plantas por cada tratamiento donde se evaluó diferentes los atributos de calidad de fruto con ello en los atributos de los Contenido de **sólidos solubles (SST)**: Se midieron los azúcares determinando los contenidos de grados Brix (Martínez et al, 2008). Igualmente se midió el **Rendimiento donde**: Se cosechó la totalidad de la parcela útil, este valor se llevó al área total del ensayo y se realizó una proyección de esta producción en (t ha<sup>-1</sup>). Finalmente se determinó el **Gasto de agua**: Para este parámetro se tomó la información de la acumulación por lamina aplicada en cada tratamiento, durante los tres meses de evaluación, detectada a través de los sensores de humedad del suelo y acumulada en la matriz del sistema

## Análisis Estadístico

Se utilizó un diseño de bloques completos al azar con un arreglo de franjas divididas, factorial (3 \* 3) 4, siendo 27 unidades experimentales, conforme al modelo matemático siguiente propuesto por Little & Hills, (1976).

$$Y_{ijkl} = \mu + \alpha_i + \gamma_j + E_{ij} + \beta_k + \delta_{jk} + (\alpha\beta)_{ik} + \rho_{ijkl}$$

Donde:  $Y_{ijkl}$  = variable de respuesta;  $\mu$  = media,  $\alpha_i$  = efecto del factor lamina (Kc),  $\gamma_j$  = efecto del bloque j,  $E_{ij}$  = error a  $(\alpha\beta)_{ik}$ ,  $\beta_k$  = efecto del factor mulch plástico,  $\delta_{jk}$  = error b  $(\alpha\beta)_{ik}$ ,  $(\alpha\beta)_{ik}$  = interacción entre lámina y mulch plástico,  $\rho_{ijkl}$  = error c

En el modelo, el FACTOR UNO correspondió a las tres láminas de agua (fijas durante todo el ciclo de evaluaciones en cada franja), determinadas a partir de los tres coeficientes de cultivo a evaluar Kc (0,50; 0,70; 0,90) donde a cada franja (tres bancales) le correspondió una lámina de agua (Kc), que se mantuvo durante todo el ciclo del cultivo (10 meses de investigación, distribuidos a partir de la siembra de los estolones y los tres (3) meses finales de evaluación efectiva realizada para medir las diferentes variables propuestas en la investigación). El FACTOR DOS (2), fue compuesto por los tres tipos de mulch plástico (Negro, Gris y Transparente), obteniendo así tres franjas cada una con tres bancales, para un total de 9 bancales de evaluación. Para las variables evaluadas, se tomaron las muestras de cada parcela distribuidas en tres repeticiones parte (I alta, II media y III baja), donde cada repetición estaba conformada por 12 plantas, determinada como área útil de evaluación, las cuales se marcaron respetando el efecto borde y efecto cabecera en el ensayo, (Figura 1). En los casos donde el ANOVA presentó diferencias estadísticas se procedió a realizar las respectivas comparaciones múltiple de promedios DHS de Tukey; todos los análisis estadísticos fueron realizados con el paquete Infostat (Di Rienzo *et al.*, 2015),

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Con base en la Tabla 3, de los cuadrados medios, se encontraron diferencias estadísticas altamente significativas para la variable fruto por planta y significativas para rendimiento (RTO) dentro la interacción mulch plástico y lámina de agua (Kc), además en la misma tabla se puede observar que dentro de los efectos simples hubo influencia del acolchado plástico (mulch), en cuanto al rendimiento y la calidad de fruto de fresa (grados brix estado 3 y 5 de madurez), además la influencia de la lámina de agua en el rendimiento ( $t \cdot ha^{-1}$ ) del cultivo de fresa, dentro del análisis de los resultados más sobresalientes a continuación de discuten los diferentes atributos del cultivo evaluados.

**Tabla 3.** Cuadrados medios de las variables rendimiento (RTO); Sólidos Solubles Totales Madurez 3 y 5 (SST)

F. V	GL	FPP #	RTO ( $t \cdot ha^{-1}$ )	SST° (BRIX) M3	SST° (BRIX) M5
MODELO	18	28,63 <sup>ns</sup>	265,9 ns	0,23 <sup>ns</sup>	0,17 <sup>ns</sup>
BLOQUE	2	41,04 <sup>**</sup>	68,76 <sup>ns</sup>	0,01 <sup>ns</sup>	0,49 <sup>ns</sup>
LAMINA	2	95,26 <sup>ns</sup>	514,5 <sup>**</sup>	0,29 <sup>ns</sup>	0,09 <sup>ns</sup>
LAMINA* BLOQUE	4	17,04 <sup>ns</sup>	9,14 <sup>ns</sup>	0,10 <sup>ns</sup>	0,02 <sup>ns</sup>
MULCH	2	8,48 <sup>ns</sup>	87,76 <sup>**</sup>	0,74 <sup>**</sup>	0,72 <sup>**</sup>
MULCH* BLOQUE	4	16,26 <sup>ns</sup>	9,84 <sup>ns</sup>	0,01 <sup>ns</sup>	0,08 <sup>ns</sup>
LAMINA* MULCH	4	23,15 <sup>*</sup>	342,1 <sup>**</sup>	0,41 <sup>ns</sup>	0,02 <sup>ns</sup>
ERROR	8	5,18	4,44	0,17	0,03
R2		0,93	0,99	0,75	0,92
CV		11,68	2,67	5,76	1,91

\*\*= Diferencias altamente significativas ( $p > 0,01$ ),  
\* Diferencias significativas ( $p > 0,05$ ), ns: no significativo

**Frutos por planta (FPP).** Los resultados mostraron que existió influencia de la interacción mulch plástico x lámina de agua en este atributo, siendo el plástico gris, negro y transparente con las láminas altas (Kc 0,9) y medias (Kc 0,7), las que mostraron los

mayores resultados número de frutos por planta; fluctuando entre 23,33 y 20,67 frutos por planta (FPP) (tabla 4), correspondiendo

estos resultados a lo denominado lamina media.

**Tabla 4.** Comparación múltiple de promedios de frutos por planta (FPP), en la interacción Lámina de agua (Kc) y Mulch plástico, en cultivo de fresa (*Fragaria x ananassa* Duch) var. Albión t.

Lámina (Kc)	Mulch plástico	Medias	n	E.E.	
0,7	Negro	23,33	3	1,31	A
0,7	Gris	23,33	3	1,31	A
0,9	Gris	22	3	1,31	A
0,9	Negro	20,67	3	1,31	A
0,7	Transparente	20,67	3	1,31	A
0,5	Transparente	18	3	1,31	A B
0,5	Negro	17,67	3	1,31	A B
0,9	Transparente	17,33	3	1,31	A B
0,5	Gris	12,33	3	1,31	B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ( $p > 0,05$ ).

Dentro de la investigación, el otro grupo estadísticamente diferencial lo formaron los tratamientos con lamina baja con plástico gris y negro cuyos valores fluctuaron entre 18 y 17,67 FPP, quedando aquí el tratamiento de lámina alta x plástico transparente (17,33 FPP), influenciado posiblemente por la alta cantidad de arvenses que se proliferaban bajo este plástico, lo cual fue favorecido por la coeficiente de cultivo (Kc 0,9), lo cual significó alta humedad que posiblemente afectó el ambiente edáfico en perjuicio del número de frutos por planta. Al respecto de los resultados, Martínez et. al. (2008), manifiestan los frutos por planta en fresa es una respuesta genotípica de acuerdo a su afinidad con la cantidad de lámina de agua aplicada, complementa al decir que la respuesta fenotípica de la planta depende del genotipo y el estadio de desarrollo de la misma en el momento del estrés, de la duración, la severidad del estrés y de los factores ambientales que lo provoquen; igualmente Fischer et al. (2012), manifiestan que el tamaño, el peso del fruto y algunas variables de producción son en general respuesta variabilidad genética propia de cada variedad,

además estas respuestas fenológicas a diversas condiciones edafoclimáticas, a su vez Solís et al. (2018) manifiestan que la productividad en estas variables depende de la respuesta genotípica y su afinidad con la cantidad de agua aplicada. Igualmente, Kreutler & Ruiz (2018), trabajando en cultivo de tomate, encontraron que el número de frutos por planta aumenta con mayores láminas de riego.

#### **Rendimiento del cultivo de fresa (RTO).**

En la tabla 3 de los cuadrados medios, se puede observar que la variable rendimiento (Valores escalados de las parcelas a  $t \cdot ha^{-1}$ ) presentó diferencias altamente significativas para la interacción mulch plástico x lámina de agua, dentro de la comparación múltiple de promedios por (tabla 5), se puede observar en la interacción mulch plástico x lámina de agua, fue el que el mayor rendimiento obtuvo con la combinación de lámina de agua alta (Kc 0,9) x mulch plástico (gris, transparente y negro) con valores de  $46,56 t \cdot ha^{-1}$  de fresa,  $46,23 t \cdot ha^{-1}$  de fresa y  $46,07 t \cdot ha^{-1}$  de fresa respectivamente; presentando diferencias estadísticas significativas con los demás tratamientos evaluados (Tabla 5).

**Tabla 5.** Comparación múltiple de promedios de rendimiento (RTO), para la interacción Lámina de agua (Kc) y Mulch plástico, en cultivo de fresa (*Fragaria x ananassa Duch*) var. Albión.

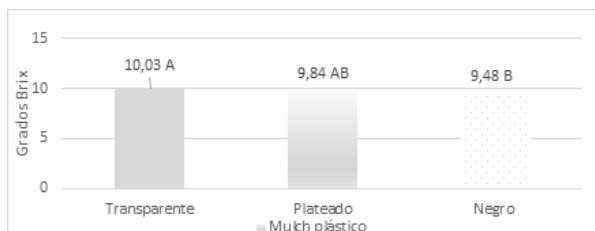
Lámina (Kc)	Mulch Plástico	Medias	n	E.E.			
0,9	Gris	46,56	3	0,7	A		
0,9	Transparente	46,23	3	0,7	A		
0,9	Negro	46,07	3	0,7	A		
0,7	Negro	43,63	3	0,7	A	B	
0,7	Gris	41,73	3	0,7		B	C
0,5	Negro	37,88	3	0,7		C	D
0,7	Transparente	36,65	3	0,7			D E
0,5	Gris	33,55	3	0,7			E
0,5	Transparente	25,34	3	0,7			F

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ( $p > 0,05$ )

Comparando los anteriores resultados con los nacionales Minagricultura (2023), manifiesta que los mayores resultados están representados por los departamentos de Caldas (37,71 t.ha<sup>-1</sup>de fresa), Cundinamarca (37,71 t.ha<sup>-1</sup>de fresa) y Antioquia (31,21 t.ha<sup>-1</sup>de fresa); comparativamente con los resultados promedios de producción en departamento de Nariño que son de 4,79 t.ha<sup>-1</sup>de fresa, permite ver la importancia de la tecnificación del cultivo con la producción obtenida en al presente investigación y el futuro que se abre con este tipo de aplicaciones en el cultivo para Nariño. Igualmente, los anteriores resultados distan de los encontrados por Kilimo, (2025), (FAO, 2023), Hernández et al., (2018), quienes encontraron los mejores rendimientos en fresa con la aplicación de lámina de agua correspondiente al coeficiente de cultivo (Kc 0.7), posiblemente dicha diferencia se debió al suelo donde se desarrolló la presente investigación que fue un suelo con altos contenido de vidrio volcánico >70%, ) con su textura arcillosa y densidad aparente de 1,10 k.dm<sup>-3</sup>, todo esto influyo en el mayor gasto y retención de agua.

### Calidad del cultivo de fresa fresa (*Fragaria x ananassa Duch*) var. Albión.

En esta variable se encontró diferencias estadísticas únicamente en los efectos simples correspondiente a la mulch plástico en estado 3 y 5 de madurez (tabla 3). Al respecto en la figura 2, se puede evidenciar que el acolchado transparente fue el de mejor resultado en el estado 5 de madurez (10,03 ° Brix), presentando diferencias estadísticas significativas con respecto a los otros dos acolchados plásticos. Situación que coincide con lo evaluado por Casierra-Posada et al., (2011), quienes al evaluar diferentes acolchados plásticos ((rojo, amarillo, azul, verde, y transparente y sin plástico) en cultivo de fresa, encontraron que el plástico transparente le confirió mejores valores de SST ° (Brix), al cultivo. Lo anterior se corrobora en las investigaciones de Alvarado-Cepeda et al., (2020), quienes encontraron igualmente los mayores valores de calidad con este tipo cobertura plástica, en ese sentido Casierra-Posada et al. (2011), indican que la cobertura transparente no permite el recalentamiento del suelo, mejorando el incremento eficiente de la tasa de asimilación neta (TAN), lo cual se refleja en el cultivo especialmente en la calidad del mismo.



**Figura 2.** Comparación múltiple de promedios SST ° (Brix) M5, en cultivo de fresa (*Fragaria x ananassa* Duch) var. Albión. Medias con una letra común no son significativamente diferentes ( $p > 0,05$  Tukey)

**Tiempo, volumen y lamina de riego aplicada en el sistema automatizado.** en cuanto a esta variable el **consumo de agua** mostró que la lámina correspondiente al coeficiente de cultivo (Kc 0,9) fue la de mayor consumo con un total de 17,12 m<sup>3</sup>/480 m<sup>2</sup>/ 90 días, equivalente a un Consumo de agua por riego de 0,238 m<sup>3</sup>./modulo/riego, valor que concuerda con lo obtenido por Chavez *et.al.* (2012), bajo condiciones similares de suelo a la presente investigación; Presentando diferencias estadísticas significativas con respecto a los demás tratamientos: A su vez el menor consumo de agua se presentó con la lámina correspondiente al (kc 0,5) con un total de 7,95 m<sup>3</sup>/480 m<sup>2</sup>/ 90 días.

## CONCLUSIONES

- Los mayores rendimientos se obtuvieron con la interacción de la lamina (Kc 0,9) y los tres tipos de acolchados (negro, gris y transparente)
- La mayor calidad en términos de SST ° (Brix) M5 se obtuvo con el mulch plástico transparente y lámina de agua (kc 0,9)
- El consumo de agua más alto se observó con la lamina correspondientes al coeficiente de cultivo (Kc 0,9)

## AGRADECIMIENTO

A la Vicerrectoría de Investigación e Interacción Social de la Universidad de Nariño por el apoyo institucional y la financiación

otorgada para la ejecución de la investigación en el marco de la convocatoria Docente 2020. Al programa de Ingeniería Agronómica, Ingeniería Electrónica e Ingeniería Acuícola; a la Granja Experimental Botana, por facilitar las instalaciones e infraestructura para la realización del trabajo de campo.

## REFERENCIAS

- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (2006). Evapotranspiración del cultivo: Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos (Estudio FAO Riego y Drenaje n.º 56). FAO. [www.fao.org](http://www.fao.org)
- Ariza, M. T., Soria, C., Medina-Juarros, J. J., & Miranda, L. (2021). Yield and fruit quality of strawberry cultivars under different irrigation regimes. *Agronomy*, 11(2), 261.
- Casierra-Posada, F., Jarma-Orozco, A., & Rojas, J. D. (2011). Efecto del color de la cobertura del suelo sobre la calidad de la fruta en fresa (*Fragaria x ananassa* Duch. cv. Albión). *Agronomía Colombiana*, 29(1), 11-18. [revistas.unal.edu.co](http://revistas.unal.edu.co)
- Castro, H. E., & Gómez, M. I. (2010). Fertilidad de suelos y fertilizantes. En Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo (Ed.), *Fundamentos para la interpretación de análisis de suelos, plantas y aguas residuales* (pp. 213-303). SCCS.
- Castro, J. A., & Chamorro, D. R. (2016). Ajuste y calibración de sensores de humedad de suelo para la gestión eficiente del riego en cultivos hortícolas. Editorial Universidad de Nariño.
- Chaves, A; Lasso, Z, Ruiz H, Benavides O. 2012. Efecto de dos coberturas plásticas y tres láminas de agua bajo un sistema de riego por goteo en un cultivo de fresa. Universidad de Nariño, Pasto, Colombia. <http://sired.udenar.edu.co/id/eprint/10112>

- Di Rienzo, J. A., Casanoves, F., Balzarini, M. G., Gonzalez, L., Tablada, M., & Robledo, C. W. (2015). InfoStat (versión 2015) [Software de cómputo]. Universidad Nacional de Córdoba. <http://www.infostat.com.ar>
- Doorenbos, J., & Pruitt, W. O. (2005). Las necesidades de agua de los cultivos (Estudio FAO 24). FAO.
- Fischer, G., Almanza-Merchán, P. J., & Miranda, D. (2012). Importancia de la ecofisiología en la producción de frutales en Colombia. *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*, 6(2), 119-137.
- Hernández-Cuello, G., Pérez-Petitón, J., & León-Fundora, M. (2018). Rendimiento de la fresa cultivada en condiciones de organopónico. *Ingeniería Agrícola*, 8(1), 21–25. <https://revistas.unah.edu.cu/index.php/IAgric/article/view/847>
- Kilimo. (2025). Plataforma de gestión de riego: Optimización de la lámina mediante Big Data. [kilimo.com](http://kilimo.com)
- Kreutler García, H., & Ruiz Eraso, H. (2018). Evaluación de coeficientes de cultivo (Kc) en diferentes fases de desarrollo de un cultivar de tomate, bajo condiciones de fertilización y riego localizado (Tesis de maestría). Universidad de Nariño. <https://sired.udenar.edu.co/15525/1/93123.pdf>
- Little, T. M., & Hills, F. J. (1976). Métodos estadísticos para la investigación agrícola. Editorial Trillas.
- Martínez, F. E., Sarmiento, J., Fischer, G., & Jiménez, F. (2008). Efecto de la deficiencia de N, P, K, Ca, Mg y B en componentes del crecimiento y el rendimiento de la fresa (*Fragaria* sp.). *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*, 2(1), 38-48.
- METER Group. (2025). Sensores de humedad del suelo: Guía de selección y especificaciones. <https://www.metergroup.com>
- Minagricultura. (2023). Cadena de la fresa. Dirección de Cadenas Agrícolas y Forestales. Grupo de Cultivos Permanentes y Hortofrutícolas, Secretaría Técnica Nacional de las Cadenas de Frutos rojos. <https://sioc.minagricultura.gov.co/Fresa/Documentos/20230331%20Cifras%20Sectoriales.pdf>
- Mohamed, H. M. I., & Mohamed, S. M. (2020). Economic study of strawberry production in Egypt. *Scientific Journal of Agricultural Sciences*, 2(1), 101-115.
- Moreno-Ortega, A., Castro-Rengifo, A. F., & Gómez-Santamaría, A. J. (2019). ¿Qué tan competitiva es la fresa colombiana en el mercado internacional? *Expresiones*, 7(13), 52-62.
- Salinas, L. (2018). *Sistemas de riego y su automatización en el cultivo de fresa*. Editorial Académica Española.
- Solem Irrigation. (2025). Sensor de humedad del suelo EC-10 HS. [solem-irrigation.com](http://solem-irrigation.com)
- Solís-Acosta, M. F., García-Toledo, P. F., Salgado-Tello, I. P., Fiallos-Ortega, L. R., & Guzmán-Acan, F. A. (2018). Aplicación de agua en diferentes láminas y frecuencias de riego para cultivo de fresa *Fragaria vesca*. *Revista Caribeña de Ciencias Sociales*. <https://www.eumed.net/rev/caribe/2018/03/riego-cultivo-fresa.html>



# Efecto del orden de suelo en la correlación entre sus propiedades y los metales pesados en el Valle del Cauca, Colombia

## Effect of soil order on the correlation between its properties and heavy metals in the Valle del Cauca, Colombia

Gilberto Eduardo Marín-Pimentel<sup>1</sup>✉, Germán Rueda-Saa<sup>1</sup>, Juan Carlos Menjívar-Flores<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidad Nacional de Colombia sede Palmira.



Vol. 54 (1 y 2) de 2024 | pp: 57 - 67 | ISSN 0562-5351 E-ISSN 2665-6558 | REC.: 16/03/2026 - ACEP.: 28/03/2026

### RESUMEN

La investigación fue desarrollada realizando un muestreo aleatorio simple (MAS) en suelos agrícolas de la zona plana y de piedemonte del Valle del Cauca. Evidencia el efecto que tienen los órdenes de suelo molisol, inceptisol y vertisol sobre la correlación de algunas propiedades físicas y químicas con los metales pesados (MP). El ajuste del muestreo individual de los indicadores a una forma grupal fue a través del índice Kaiser-Meyer-Olkin (KMO) y la prueba de esfericidad de Bartlett, efectuando correlación de spearman y análisis de componentes principales (APC). El vertisol fue el orden de mayor cantidad de indicadores asociados (pH, MO, CE, CICA, n, CC, PMP, Ks, Da, Cd, Cr, Ni y Co), seguido del molisol (pH, MO, CE, CICA, n, Ks, Da, Cd, Cr, Ni, Pb y Co) y al final el inceptisol (pH, MO, CE, CICA, Ks, Da, Hg, Cr, Ni y Co). El molisol relacionó fenómenos ligados a la fertilidad y el movimiento de agua en el suelo con los MP. En el inceptisol incluye situaciones relacionadas en el suelo con la fertilidad, contenido de sales, velocidad del agua y la compactación. La fertilidad, humedad, velocidad del agua y compactación estuvo enlazado al orden de suelo vertisol. Admitiendo la importancia del manejo del suelo en función de su heterogeneidad en la región. En los órdenes la concentración total de Cr, Ni y Co tiene conexión con alguna propiedad del suelo. Evidenciando que la heterogeneidad de los suelos no juega un papel importante en el control o manejo de estos elementos.

**Palabras claves:** Correlación, Metales pesados, Muestreo, Orden de suelo, Propiedades del suelo.

### ABSTRACT

The research was conducted using simple random sampling (SRS) in agricultural soils of the flat and piedmont areas of the Valle del Cauca. It demonstrates the effect of the soil orders Mollisols, Inceptisols, and Vertisols on the correlation of certain physical and chemical properties with heavy metals (HM). The Kaiser-Meyer-Olkin (KMO) index and Bartlett's test of sphericity were used to adjust the individual sampling of the indicators to a grouped form, performing Spearman correlation and principal component analysis (PCA). Vertisols had the highest number of associated indicators (pH, OM, EC, CICA, n, CC, PMP, Ks, Da, Cd, Cr, Ni, and Co), followed by Mollisols (pH, OM, EC, CICA, n, Ks, Da, Cd, Cr, Ni, Pb, and Co), and finally Inceptisols (pH, OM, EC, CICA, Ks, Da, Hg, Cr, Ni, and Co). Mollisols were associated with phenomena related to soil fertility and water movement. Inceptisols included soil conditions related to fertility, salt content, water velocity, and compaction. Fertility, moisture, water velocity, and compaction were linked to the Vertisols soil order, highlighting the importance of soil management in light of its heterogeneity in the region. In each soil order, the total concentration of Cr, Ni, and Co was associated with certain soil properties. Demonstrating that soil heterogeneity does not play an important role in the control or management of these elements.

**Keywords:** Correlation, Heavy metals, Sampling, Soil order, Soil properties.

## INTRODUCCIÓN

La superficie ocupada en la agricultura es aproximadamente es una tercera parte de la superficie terrestre (Burbano, 2016). En América Latina y el Caribe se valora en aproximadamente 800 millones de hectáreas de tierra con potencial agrícola (FAO, 2016). En Colombia existen 22 millones de hectáreas con aptitud agrícola, de las cuales solamente 5 millones se utilizan para la agricultura (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible [MADS], 2016). El Valle del Cauca, una región que ha sido tradicionalmente agrícola, reflejado en las cifras del plan frutícola del Valle del Cauca (Tafur et al., 2006), las cuales marcan que la zona cuenta con más de 2 millones de hectáreas, de las cuales el 17.5 % de la zona se asocia a labores productivas principalmente con cultivos comerciales como la caña de azúcar y los frutales. El incremento de las actividades agrícolas, el pastoreo, la silvicultura y la urbanización genera una progresiva presión sobre los suelos (Olivera & Avellaneda, 2018).

El recurso suelo es primordial para la vida en la tierra, ya que una administración diligente simboliza un elemento fundamental para la agricultura sostenible (FAO, 2015). Para gestión minuciosa del medio edáfico por actividades agrícolas será necesario considerar su variabilidad espacial en la zona de interés. La interpretación y el entendimiento espacial de la variabilidad del suelo, ayudará a optimizar la eficiencia del uso del suelo, incrementar su calidad además de favorecer la protección del ambiente ecológico (Yan et al., 2019). Para sostenibilidad de los agroecosistemas es indispensable desarrollar estrategias de uso del suelo particulares por sitio, en adaptación a la heterogeneidad de las propiedades del suelo (Bogunovic et al., 2017). Al no considerar la variabilidad espacial de las propiedades del suelo a nivel regional, es decir manejarlo de forma uniforme, puede

apresurar su deterioro (Francirlei de Oliveira et al., 2019).

La heterogeneidad de los suelos en el Valle del Cauca es evidenciada en los órdenes de suelo molisol, inceptisol y vertisol. Los suelos molisoles se destacan por tener altos contenidos de materia orgánica, oscuros, ricos en bases de las estepas, generalmente con un epipedón mólico, también muchos de ellos poseen un horizonte nátrico, argílico o cálcico y algunos un horizonte álbico, duripan o petrocálcico (Buol et al., 2014). Los suelos inceptisoles son suelos evolutivamente muy jóvenes y muestran ciertas evidencias de desarrollo de sus horizontes (Ibáñez et al., 2011). Tienen un horizonte cámbico y un epipedón ótrico de regiones húmedas y subhúmedas y frías a muy cálidas (Yang et al., 2019). Los suelos vertisoles tienen una textura arcillosa con grandes y profundas grietas en algún momento del año y con aparición de micro relieve de gilgai (Gisbert et al., 2011) y con altos contenidos de arcillas expansivas (Kabata-Pendias, 2011).

A nivel regional existe un estudio semidetallado de suelos, que determinó las características de los suelos y su vocación (CVC, 2014). Más no existe un estudio que evalué la correlación espacial de la propiedades físico-químicas y los metales pesados en los suelos por orden de suelo utilizando un análisis multivariado. Existen estudios regionales que evidencian la importancia de este tipo de análisis, como el realizado por Francirlei de Oliveira et al. (2019), cuyo propósito fue definir zonas homogéneas de manejo, a través de estadística multivariada, además de evaluar el resultado de manejo uniforme sobre las propiedades físicas y químicas de la zona de estudio, validando el supuesto que un tipo de manejo indiferenciado acelera el potencial erosivo y el deterioro del suelo. Algo semejante ocurre cuando se involucra geoestadística, es así como Salgado et al. (2019), encontraron

propiedades del suelo con alta, mediana y baja dependencia espacial, reconocimiento de zonas parciales de diferente variabilidad y como estas varían con la distancia, para realizar recomendaciones de manejo. Montanari et al. (2008), evaluaron en un suelo de Brasil, la variabilidad de las propiedades físicas en sistema de manejo siembra directa, encontrando la mutabilidad en función de un coeficiente estadístico y otro geoestadístico.

La presente investigación representa un avance en la gestión de los suelos de la región y para ello se plantea el objetivo de evaluar el efecto del orden de suelo en la correlación propiedades físicas y químicas de los suelos y metales pesados y/o metaloides, que sirva de línea base para otros estudios y soporte para el manejo del suelo en función de su clasificación taxonómica.

## MATERIALES Y MÉTODOS

El área de estudio corresponde a la zona plana y de piedemonte del Valle del Cauca, que presenta un comportamiento climático característico de las zonas tropicales del mundo. En la cual se muestrearon 489 correspondientes a lugares que desarrollan actividades agrícolas. A través de un muestreo aleatorio simple (MAS) (Corral & Franco Corral, 2015), con 271 sitios que corresponde al orden de suelo Molisol, 128 a orden Vertisol y los restantes a orden Inceptisol (Marín-Pimentel et al., 2023).

Las propiedades físicas y químicas con su respectiva abreviatura y unidad analizadas fueron Arcilla (%), Arena (%), Limo (%), Densidad Aparente (Da) ( $\text{g.cm}^{-3}$ ), Conductividad Hidráulica Saturada (Ks) ( $\text{cm.h}^{-1}$ ), Porosidad ( $\eta$ ) (%), Retención hidráulica a 1 bar (CC) (% p.v<sup>-1</sup>), Retención Hidráulica a 15 bares (PMP) (% p.v<sup>-1</sup>), Lámina de agua aprovechable (mm) (LAA), pH (Adimensional), Materia Orgánica (MO) (%), Capacidad de Intercambio Catiónico (CICA)

(Cmol (+)  $\text{Kg}^{-1}$ ), Conductividad Eléctrica (CE) ( $\text{dS.m}^{-1}$ ). Cuantificadas en laboratorios especializados (Marín-Pimentel et al., 2023). Las concentraciones totales de los metales pesados (MP): Mercurio (Hg), Cadmio (Cd), Cromo (Cr), Níquel (Ni), Plomo (Pb) y Cobalto (Co) y el metaloide Arsénico (As) dadas en  $\text{mg. kg}^{-1}$ . Encontrándose variación por orden de suelo (Rueda-Saa et al., 2025).

Los valores medios por propiedad del suelo fueron determinados para el muestreo completo (489) (Marín-Pimentel et al., 2023). El ajuste del muestreo individual de los indicadores a una forma grupal fue a través del índice Kaiser-Meyer-Olkin (KMO), el cual calcula el ajuste de la muestra a través de valores que deben fluctuar entre 0.50 y 1.00 y para lo cual es apropiado aplicar el análisis factorial, y la prueba de esfericidad de Bartlett permite probar la hipótesis nula que muestra que las variables no están correlacionadas en una población, por consiguiente si su valor es menor a 0.05 se rechaza dicha hipótesis y se continua con el respectivo análisis (Montoya, 2007). La correlación entre los indicadores cuyos datos que no siguen una distribución normal fue a través coeficiente de correlación de "Spearman" (Martínez Ortega et al., 2009). El análisis de componentes principales (ACP) fue realizado para aquellas variables que tienen correlación. Fueron utilizados los programas estadísticos SAS University Studio (Cody, 2015) y RStudio versión 4.1.3 (Venables & Smith, 2022).

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Orden de suelo Molisol

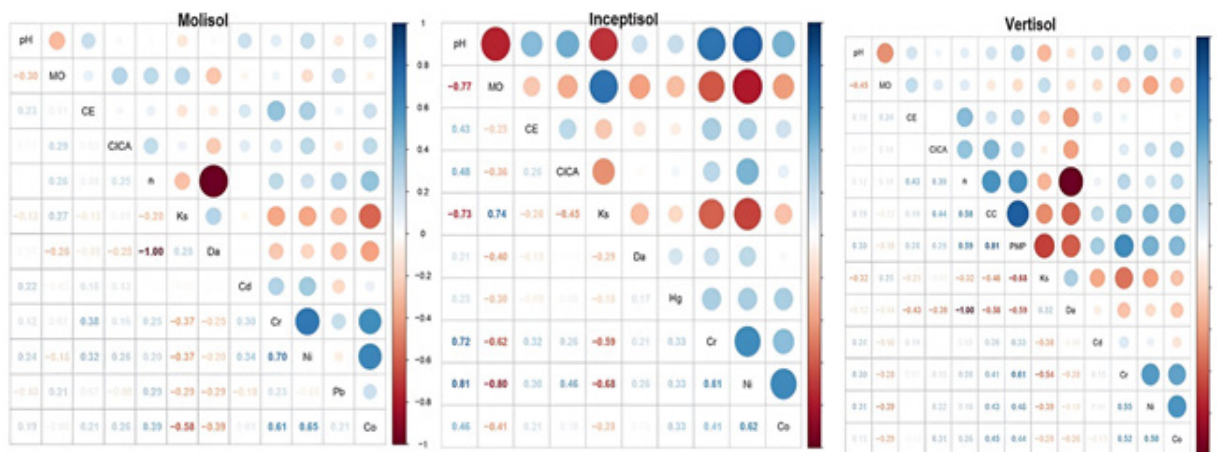
El análisis de las relaciones entre las propiedades físicoquímicas en el orden de suelo molisol ( $n=271$ ), el índice Kaiser-Meyer-Olkin y la prueba de esfericidad de Bartlett (Garmendia, 2010), evidencian que los indicadores físicos, químicos y metales pesados y/o metaloides tuvieron correlación (Tabla 1).

**Tabla 1.** Índice Kaiser-Meyer-Olkin (KMO) y la prueba de esfericidad de Bartlett las propiedades del suelo y los metales pesados en los órdenes de suelo molisol, inceptisol y vertisol.

Molisol													
Indicador	pH	MO	CE	CICA	$\eta$	Ks	Da	Cd	Cr	Ni	Pb	Co	
Índice Kaiser-Meyer-Olkin	0.61	0.68	0.67	0.69	0.58	0.76	0.58	0.64	0.70	0.71	0.56	0.76	
Prueba de esfericidad de Bartlett	Chi cuadrado								11271				
	Grados de libertad								11				
	Nivel de significancia								p –value < 2.2 x 10 <sup>-16</sup>				
Inceptisol													
Indicador	pH	MO	CE	CICA	Ks	Da	Hg	Cr	Ni	Co			
Índice Kaiser-Meyer-Olkin	0.83	0.81	0.60	0.77	0.81	0.65	0.81	0.87	0.80	0.83			
Prueba de esfericidad de Bartlett	Chi cuadrado						3932.9						
	Grados de libertad						9						
	Nivel de significancia						p –value < 2.2 x 10 <sup>-16</sup>						
Vertisol													
Indicador	pH	MO	CE	CICA	n	CC	PMP	Ks	Da	Cd	Cr	Ni	Co
Índice Kaiser-Meyer-Olkin	0.68	0.80	0.71	0.70	0.68	0.72	0.71	0.83	0.68	0.68	0.77	0.81	0.74
Prueba de esfericidad de Bartlett	Chi cuadrado							5332					
	Grados de libertad							12					
	Nivel de significancia							p –value < 2.2 x 10 <sup>-16</sup>					

El análisis multivariado el coeficiente de correlación de Spearman para las variables correlacionadas resalta en el orden de suelo molisol que la n y la Da presentaron

una relación entre fuerte y perfecta, entre moderada y fuerte el Cr y Ni, al igual que entre el Pb y Ni y el Cr y Co, de la misma forma que la Ks y el Co (Martínez et al., 2009) (Figura 1).



**Figura 1.** Correlación de Spearman las propiedades del suelo y los metales pesados los órdenes de suelo molisol, inceptisol y vertisol.

El análisis de componentes principales (APC) entre las propiedades fisicoquímicas del suelo en el orden molisol y las concentraciones totales de MP expuso que los cuatro primeros componentes presentaron un valor propio mayor que 1 y explican el 64.62% de varianza total (Tabla 2). En ese sentido, el primer componente explica el 26.50% de la varianza total y las variables de mayor contribución fueron de forma positiva la porosidad, el Cr, el Ni y el Co, mientras que de forma negativa la densidad aparente. El Cr es elemento que se hereda de la roca madre y un contenido total mayor al 80.00% en suelos se encuentra en forma residual inmóvil y los contenidos más altos son originarios de sedimentos arcillosos, rocas máficas y también en suelos formados a partir de serpentinas sus contenidos son altos ( $>100000 \text{ mg.kg}^{-1}$ ) (Kabata-Pendias & Mukherjee, 2007). Normalmente las mayores concentraciones de Cr se localizan en suelos arcillosos pesados (Cambisoles) y en ocasiones en suelos orgánicos (Histosoles) (Kabata-Pendias, 2011).

El Ni está localizado en las rocas ígneas y está involucrado en las etapas geoquímicas de los ciclos mineralógicos, entonces está presente en rocas sedimentarias, metamórficas, suelos y sedimentos (Alloway, 2012). Para ilustrar la relación entre las fracciones del suelo y los MP, Alamgir (2016) refiere que para la movilidad de estos elementos en el suelo son importantes la textura y los tipos de minerales, específicamente la fracción arcillosa que engloba minerales arcillosos y tiene una robusta capacidad de enlazar metales debido a su gran capacidad de sorción, alta capacidad específica, CIC, estabilidad química y mecánica, asimismo como estructura en capas. En el caso del segundo componente la mayor contribución a la varianza fue de forma negativa de la materia orgánica. La MO en el medio edáfico incrementa o reduce la biodisponibilidad de MP por procesos de movilización e

inmovilización cuando se forman ciertos complejos orgánicos de MP, además, tiene un papel de depósito adsorbente reactivo con esos elementos gracias a alta área superficial y gran reactividad en función a sus grupos funcionales de S, O y N (Alamgir, 2016).

En el tercer componente las variables de mayor contribución fueron la capacidad de intercambio catiónico, la conductividad hidráulica saturada y el Cd de forma positiva, mientras el Pb contribuye de forma negativa. La textura juega un papel importante sobre el control de la concentración de Cd en los suelos (Kabata-Pendias, 2011). La movilidad de Cd en los suelos está ligada a la formación de complejos y las reacciones de óxido-reducción, además la sorción por parte del material húmico es consecuente con un incremento del pH (Kabata-Pendias & Mukherjee, 2007). Con el Pb Alloway (2012) expone que en suelos con labores agrícolas las propiedades pH, CIC, MO, porcentaje de arcilla y los  $\text{CaCO}_3$  fueron correlacionados con la absorción de este elemento.

En el cuarto componente la mayor contribución positiva fue de la conductividad eléctrica y negativa del pH. Normalmente un incremento del pH aumenta la sorción de metales y cuando disminuye por debajo de 5.00 el aumento de la concentración de protones beneficia la movilidad. En este sentido, es posible hallar más metales en la solución del suelo cuando menor es el valor del pH y a su vez se movilizan más los MP (Alamgir, 2016). Un incremento de la salinidad en el suelo, es decir un aumento de la conductividad eléctrica, incrementa la movilidad o retención de metales, cuando los cationes K y Na en los sitios de cambio reemplazan a los metales, seguido de la formación de compuestos estables entre los aniones de sulfato y cloruro y los metales como el Pb, Zn, Cu, Cd o Hg (Galán Huertos & Romero Baena, 2008).

**Tabla 2.** Componentes principales para las propiedades del suelo y los MP correlacionados en los ordenes de suelo molisol, inceptisol y vertisol.

<b>Molisol</b>				
<b>Indicador</b>	<b>Componentes principales</b>			
	<b>C1</b>	<b>C2</b>	<b>C3</b>	<b>C4</b>
pH	0.0405911	0.29362196	0.19113988	<b>-0.51892332</b>
MO	0.1434991	<b>-0.50085470</b>	0.11322784	0.20649853
CE	0.1139654	-0.21013007	0.15265623	<b>0.54916467</b>
CICA	0.1682578	-0.18168110	<b>0.41185903</b>	-0.24604054
$\eta$	<b>0.4169096</b>	-0.35761587	-0.08815125	-0.25687551
Ks	-0.2464381	-0.26338064	<b>0.32597921</b>	0.03649964
Da	<b>-0.4169096</b>	0.35761586	0.08815113	0.25687535
Cd	0.1580782	0.13031142	<b>0.57867032</b>	-0.13313668
Cr	<b>0.4054849</b>	0.24638586	0.09045187	0.34462204
Ni	<b>0.3667351</b>	0.34724210	0.16033583	0.20363680
Pb	0.1701114	-0.02435422	<b>-0.49711993</b>	-0.11227808
Co	<b>0.4186447</b>	0.24852206	-0.14153736	0.04574844
Valor propio	3.179762	2.127693	1.289628	1.157330
Proporción de la varianza	26.50%	17.30%	10.75%	9.64%
Varianza acumulada	26.50%	44.23%	54.98%	64.62%

<b>Inceptisol</b>			
<b>Indicador</b>	<b>Componentes principales</b>		
	<b>C1</b>	<b>C2</b>	<b>C3</b>
pH	<b>-0.4213491</b>	0.1608494	-0.0002260
MO	<b>0.4126560</b>	-0.1487840	-0.2474486
CE	-0.1007413	<b>0.5237177</b>	-0.3742850
CICA	-0.2284232	<b>0.4413334</b>	0.0655960
Ks	<b>0.3543654</b>	-0.2283986	-0.2806217
Da	-0.1426318	-0.3435636	<b>0.6305472</b>
Hg	-0.1744314	-0.3762165	<b>-0.3786102</b>
Cr	<b>-0.3885553</b>	-0.1335574	-0.2006156
Ni	<b>-0.4121102</b>	-0.2662333	-0.0327295
Co	-0.3044651	-0.2871878	<b>-0.3652057</b>
Valor propio	4.2296665	1.5299674	1.1958885
Proporción de la varianza	42.30%	15.30%	11.96%
Varianza acumulada	42.30%	57.60%	69.56%

<b>Vertisol</b>				
<b>Indicador</b>	<b>Componentes principales</b>			
	<b>C1</b>	<b>C2</b>	<b>C3</b>	<b>C4</b>
pH	0.19378119	-0.24851654	<b>-0.402033256</b>	0.02539183
MO	-0.11356970	<b>0.49701389</b>	0.093964876	0.07272599
CE	0.04396863	0.29924662	-0.307667128	<b>-0.53521809</b>
CICA	0.17397566	0.23678756	0.200562583	<b>0.64561346</b>
$\eta$	0.34876932	<b>0.39138377</b>	0.009110681	-0.04215321
CC	<b>0.40272272</b>	0.06235565	0.035008493	0.06046151
PMP	<b>0.42937047</b>	-0.01816291	-0.120426544	-0.08871572
Ks	-0.33275041	0.08609062	0.198367630	0.09412851
Da	-0.34876917	<b>-0.39138384</b>	-0.009110258	0.04215308
Cd	0.06687914	-0.11209782	<b>-0.599715424</b>	0.49728911
Cr	<b>0.30822247</b>	-0.23478429	0.120939363	-0.07341079
Ni	0.22364721	<b>-0.33512852</b>	0.195482827	-0.11763446
Co	0.25944291	-0.21818992	<b>0.476353998</b>	0.01809810
Valor propio	4.484900	2.234963	1.138018	0.9939560
Proporción de la varianza	34.50%	17.19%	8.75%	7.64%
Varianza acumulada	34.50%	51.69%	60.44%	68.09%

### Orden de suelo inceptisol

En orden de suelo inceptisol fue realizado un procedimiento diferente para analizar las correlaciones entre las propiedades físicas y químicas del suelo utilizando Kaiser-Meyer-Olkin (KMO) y la prueba de esfericidad de Bartlett (Marín-Pimentel et al., 2023; Montoya Suárez, 2007). Esto debido a que al calcular los índices de correlación utilizando las 13 variables existió el error que la matriz no es invertible y la imagen no se encuentra (Cody, 2015). Posiblemente se deba a que existan columnas dependientes linealmente, es decir, hay variables fuertemente correlacionadas y la forma de solucionar es eliminar esas variables (Stack Exchange, 2013). Los resultados finales de correlación se presentan en la tabla 1.

El coeficiente de correlación de Spearman para las propiedades fisicoquímicas y los metales pesados correlacionados en el orden de suelo inceptisol y en función de la clasificación enunciada por Martínez et al. (2009) los indicadores que tuvieron entre fuerte y perfecta correlación son el pH con la MO, la MO y el Ni y finalmente el pH y el Ni (Figura 1). Entre tanto la correlación fue moderada y fuerte para (pH y Ks), (MO y Ks), (pH y Cr), (MO y Cr), (Ks y Cr), (Ks y Ni) y finalmente (Ni y Co). Las restantes correlaciones fueron débiles para el rango entre 0.26-0.50 y escasa o nula (0.00 – 0.25) (Figura 1). En el primer componente los indicadores que mayor contribución de forma positiva fueron la materia orgánica y conductividad hidráulica saturada, entre tanto el aporte de forma negativo fue del indicador químico pH y los MP Cr y Ni.

(Hooda, 2010) indica que tanto para el Ni, Co y otros oligoelementos la solubilidad decrece al aumentar el pH, mencionando también que en alto porcentaje el Cr (III) se encuentra en el suelo en forma inmóvil sin posibilidad de ingresar a la cadena alimentaria a diferencia del Cr (IV) que en un pH alcalino es altamente móvil, siendo de gran preocupación esta última situación porque normalmente en la agricultura se utiliza el encalado para elevar el pH del suelo y disminuir la absorción excesiva de oligoelementos.

Una disminución en la movilidad de los metales se da normalmente en condiciones reductoras, en específico la partición de metales traza activos como el Cr y molibdeno es afectada por las reacciones de oxidación reducción al igual que los elementos Zn, Cu y Ni considerados como elementos redox estables (Alamgir, 2016). La reducción de  $Cr^{+6}$  a  $Cr^{+3}$  está sometida por la materia orgánica que a su vez controla la fitodisponibilidad o comportamiento del Ni junto a otras propiedades del suelo (Kabata-Pendias, 2011). En el segundo componente principal la mayor contribución por parte de la conductividad eléctrica y la capacidad de intercambio catiónico. Corte-D et al. (2013) encontraron una relación espacial directa entre la conductividad eléctrica y los cationes calcio, sodio y magnesio en suelo de orden Andisol. El tercer componente agrupo a la variable densidad aparente y el elemento mercurio. El Hg en suelos presenta gran afinidad por aquellos ricos en materia orgánica o turba, así también como en bosques y suelos cultivados con arroz (Hooda, 2010).

### Orden de suelo vertisol

En el orden vertisol el índice Kaiser-Meyer-Olkin (KMO) y la prueba de esfericidad de Bartlett reveló correlación entre las propiedades fisicoquímicas presentada (Tabla 1). El coeficiente de correlación de Spearman muestra que las parejas de indicadores

entregan una correlación entre fuerte y perfecta fueron la  $\eta$  y Da, la CC y el PMP, mientras tanto, entre moderada y fuerte los duetos de variables fueron  $\eta$  y CC,  $\eta$  y PMP, Ks y PMP, CC y Da, PMP y Da, PMP y Cr, Ks y Cr, Ni y Cr, Co y Cr y Ni y Co, las restantes relaciones estuvieron entre débil y escasa o nula (Martínez et al., 2009) (Figura 1).

En el primer componente principal las propiedades físicas CC y PMP, junto con el metal pesado Cr fueron las variables de mayor contribución al componente en forma positiva. Normalmente en condiciones aeróbicas, pH alto, MO baja aparece el Cr (VI) en los suelos y como producto de la oxidación del Cr (III) bajo contenidos de óxidos de Mn y Fe, mientras que en suelos ácidos y anóxicos con gran contenido orgánico se da la transformación del Cr (VI) a Cr (III) (Hooda, 2010). En el segundo componente las variables de mayor aporte la varianza total, de forma positiva, fueron la MO y la  $\eta$ , mientras que de forma negativa correspondió a la Da y al metal pesado Ni. En los perfiles del suelo y de acuerdo a los tipos de suelo, la materia orgánica, las fracciones de arcilla y los óxidos amorfos están relacionados con la distribución del Ni, a su vez de forma muy general hay una fina relación entre la CIC y el %arcilla con el metal pesado Ni (Kabata-Pendias, 2011). Comparando los suelos arcillosos con los arenosos, estos últimos tienen una capacidad de sorción de metales pesados menor que los primeros, al poseer tamaños de poros más grandes que implica el movimiento de estos elementos hacia aguas subterráneas o superficiales y a su vez las cantidades de elementos traza como constituyentes de los minerales arcillosos es insignificante, su importancia estriba en su capacidad de sorción (Alamgir, 2016).

En el tercer componente las variables de mayor contribución fueron el pH y Cd de forma negativa, el Co de forma positiva. En efecto Kabata-Pendias y Murkherjee (2007) aluden

la estrecha relación entre la MO y la adsorción de Cd y Pb, no obstante, no se puede separar del pH porque es una variable que condiciona la constitución de complejos de materia orgánica. Por lo que se refiere al cobalto, el pH en el suelo conduce a sorción y oxidación de la forma química  $\text{Co}^{+2}$  y a la reducción del  $\text{Co}^{+3}$  (Alloway, 2012). En el cuarto componente los indicadores de mayor contribución fue la CE (forma negativa) y la CICA (forma positiva). La capacidad de intercambio catiónico tiene un poder dominante sobre la retención de MP, siendo mayor en suelos arcillosos que en arenosos, más alta en arcillas 2:1 que entre arcillas 1:1 y a su vez en orden decreciente de CIC se manifiestan montmorillonita, imogolita > vermiculita > illita, clorita > haloisita > caolinita (Alamgir, 2016). La presencia de  $\text{CaCO}_3$  disminuye la solubilidad de los oligoelementos al aumentar el pH así también la formación de carbonatos metálicos por comparecencia de contenidos de carbonato o bicarbonatos en el suelo precipita estos elementos o los hace poco solubles (Hooda, 2010).

## CONCLUSIONES

La correlación entre propiedades físicas y químicas del suelo con los metales pesados estuvo diferenciada por orden de suelo. El orden de suelo vertisol fue el de mayor cantidad de indicadores asociados, seguido del molisol y por último del vertisol. El orden molisol relacionó variables ligadas a la fertilidad del suelo el movimiento de agua con los metales pesados. En orden inceptisol la correlación los metales pesados incluye fenómenos en el suelo de fertilidad, contenido de sales, velocidad del agua y posiblemente ligado a la compactación. La fertilidad, contenido de humedad, velocidad del agua y compactación del suelo estuvo enlazado al orden vertisol. Validando la importancia del manejo del suelo en la zona plana y de piedemonte del Valle del Cauca en función de su heterogeneidad. La correlación de los metales pesados Cr, Ni

y Co con las propiedades del suelo no son afectadas por la clasificación taxonómica del suelo. Es decir, en los diferentes ordenes analizados la concentración total de estos elementos tiene conexión con alguna propiedad del suelo. A su vez estos elementos tuvieron una contribución apreciable a la varianza del muestreo por orden, siendo el más destacable el Cr en conjunto evidenciando que la heterogeneidad de los suelos no juega un papel importante en el control o manejo de estos elementos. Mas bien pueden estar asociados al manejo de entrada al suelo por distintas vías, especialmente la relacionada con actividades agrícolas.

## AGRADECIMIENTOS

La financiación de la investigación fue con el apoyo de la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca (CVC) y la Universidad Nacional de Colombia sede Palmira a través del convenio interadministrativo número 150 de 2017.

## REFERENCIAS

- Alamgir, M. (2016). Effects of Soil Properties to the Extent of Soil Contamination with Metals. In *Environmental Remediation Technologies for Metal-Contaminated Soils* (pp. 1–19).
- Alloway, B. (2012). Heavy Metals in Soil. In *Handbook on the Toxicology of Metals: Fifth Edition*. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-822946-0.00032-5>
- Bogunovic, I., Trevisani, S., Seput, M., Juzbasic, D., & Durdevic, B. (2017). Short-range and regional spatial variability of soil chemical properties in an agro-ecosystem in eastern Croatia. *Catena*, 154, 50–62. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2017.02.018>

- Buol, S. W., Southard, R. J., Graham, R. C., & McDaniel, P. A. (2014). U.S. Soil Taxonomy. In *Soil Genesis and Classification* (pp. 207–232). <https://doi.org/10.1002/9780470960622.ch7>
- Burbano Orjuela, H. (2016). El suelo y su relación con los servicios ecosistémicos y la seguridad alimentaria. *Revista de Ciencias Agrícolas*, 33(2), 117–124. <https://doi.org/10.22267/rcia.163302.58>
- Cody, R. (2015). An Introduction to SAS University Edition. *Zoological Research*, 9(2), 192. <http://www.zoores.ac.cn/EN/abstract/abstract1192.shtml%5Cnhttp://www.zoores.ac.cn/CN/article/downloadArticleFile.do?attachType=PDF&id=1192>
- Corral, Y., & Franco Corral, A. (2015). Procedimientos de muestreo. *Revista Ciencias de La Educación*, 26(46), 151–167. <http://servicio.bc.uc.edu.ve/educacion/revista/46/art13.pdf>
- Cortés-D, D., Pérez-B, J., & Camacho-Tamayo, J. (2013). Relación espacial entre la conductividad eléctrica y algunas propiedades químicas del suelo. *Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica*, 16(2), 401–408. <https://doi.org/10.31910/rudca.v16.n2.2013.912>
- CVC. (2014). *Levantamiento semidetallado de suelos*. <https://ecopedia.cvc.gov.co/suelo/caracteristicas-del-suelo/levantamiento-semidetallado-de-suelos-escala-125000-de-las-cuencas>
- FAO. (2015). Estado mundial del recurso del suelo (EMRS) - Resumen Técnico. In *Fao*. [www.fao.org/publications](http://www.fao.org/publications)
- FAO. (2016). *Estado mundial del recurso suelo*. <http://www.fao.org/3/a-i5126s.pdf>
- Francirlei de Oliveira, J., Mayi, S., Marchão, R. L., Corazza, E. J., Hurtado, S. C., Malaquias, J. V., Tavares Filho, J., Brossard, M., & Guimarães, M. de F. (2019). Spatial variability of the physical quality of soil from management zones. *Precision Agriculture*, 20(6), 1251–1273. <https://doi.org/10.1007/s11119-019-09639-9>
- Galán Huertos, E., & Romero Baena, A. (2008). Contaminación de Suelos por Metales Pesados. *Macla: Revista de La Sociedad Española de Mineralogía*, 10, 48–60. [http://www.ehu.eus/sem/macla\\_pdf/macla10/Macla10\\_48.pdf](http://www.ehu.eus/sem/macla_pdf/macla10/Macla10_48.pdf)
- Garmendia, M. L. (2010). Análisis factorial: una aplicación en el cuestionario de salud general de Goldberg, versión de 12 preguntas. *Revista Chilena de Salud Pública*, 11(2), 57–65. <https://doi.org/10.5354/0717-3652.2007.3095>
- Gisbert Blanquer, J. M., Ibáñez Asensio, S., & Moreno Ramón, H. (2011). Vertisoles. *Universidad Politecnica de Valencia*, 6. <https://riunet.upv.es/500>
- Hooda, P. S. 2010. Trace Elements in soil. <https://www.researchgate.net/file.312659449188353@1451555230198>
- Ibáñez, S., Gisbert, J. M., & Moreno, H. (2011). Inceptisoles. *Editorial Universidad Politecnica de Valencia*, 8. <https://riunet.upv.es/500>
- Kabata-Pendias, A. (2011). Trace elements in soils and plants: Fourth edition. In *Trace Elements in Soils and Plants, Fourth Edition*. <https://doi.org/10.1201/b10158>
- Kabata-Pendias, A., & Mukherjee, A. (2007). Trace elements from soil to human. In *The Behavior of Chemical Elements in Stars*. <https://doi.org/10.1017/cbo9780511661488.022>

- Marín-Pimentel, G.-E., Rueda-Saa, G., & Menjivar-Flores, J. C. (2023). Evaluation of physicochemical properties in agricultural soils on the flat and piedmont areas of Valle del Cauca, Colombia with emphasis on degradation. *Environmental Earth Sciences*, 82(157), 1–11. <https://doi.org/10.1007/s12665-023-10813-6>
- Martínez Ortega, R. M., Tuya Pendás, L. C., Martínez Ortega, M., Pérez Abreu, A., & Cánovas, A. M. (2009). El coeficiente de correlación de los rangos de Spearman caracterización. *Revista Habanera de Ciencias Médicas*, 8(2), 19. [http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1729-519X2009000200017](http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1729-519X2009000200017)
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible [MADS]. (2016). Gestión Sostenible del Suelo. In *Política para la Gestión Sostenible del Suelo*. [http://www.andi.com.co/Uploads/Política\\_para\\_la\\_gestión\\_sostenible\\_del\\_suelo\\_FINAL.pdf](http://www.andi.com.co/Uploads/Política_para_la_gestión_sostenible_del_suelo_FINAL.pdf)
- Montanari, R., Passos e carvalho, M., Alves, M. C., Dafonte Dafonte, J., Paz González, A., & Machado SIQUEIRA, G. (2008). Variabilidad Espacial De Propiedades Físicas De Un Ferralsol En Selvíria ( Ms , Brasil ). *Revista Científica Agropecuaria*, 12 (March 2008), 15–23.
- Montoya Suárez, O. (2007). Aplicación del análisis factorial a la investigación de mercados. Caso de estudio. *Scientia et Technica*, 3(35), 281–286. <http://dialnet.unirioja.es/servlet/>
- Olivera Sánchez, C., & Avellaneda Torres, L. M. (2018). *Guía de buenas prácticas para la Gestión y uso sostenible de los suelos en áreas rurales* (p. 144). <http://www.fao.org/3/i8864es/i8864ES.pdf>
- Rueda-Saa, G., Marín-Pimentel, G. E., & Menjivar-Flores, J. C. (2025). Baseline concentration of heavy metals in agricultural soils.pdf. *Revista de Ciencias Agrícolas*, 42(2), 1–15. <https://doi.org/https://doi.org/10.22267/rcia.20254202.259>
- Salgado Velásquez, S., Salgado García, S., Rodrigues, F. A., Palma López, D., Córdova Sánchez, S., Rincon Ramírez, J., & López Castañeda, A. (2019). VARIABILIDAD ESPACIAL DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS DE UN SUELO ACRI SOL CULTIVADO CON CAÑA DE AZÚCAR. *Journal of Chemical Information and Modeling*, 53(9), 1689–1699. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Stack Exchange. (2013). Error “system is computationally singular” when running a glm. Cross Validated.
- Tafur Reyes, C., Toro Mesa, J. C., Reyes, C. E., García Negrette, R., & Muñoz, C. A. (2006). *Plan Frutícola Nacional: Valle del Cauca, tierra de frutas*. Tallers gràfics de Impresora Feriva S.A. [http://www.asohofrucol.com.co/archivos/biblioteca/biblioteca\\_117\\_PFNValledelCauca.pdf](http://www.asohofrucol.com.co/archivos/biblioteca/biblioteca_117_PFNValledelCauca.pdf)
- Venables, W. ., & Smith, D. . (2022). An Introduction to R. *Practical Graph Mining with R*, 3, 27–52. <https://doi.org/10.1201/b15352-7>
- Yan, P., Peng, H., Yan, L., & Lin, K. (2019). Spatial variability of soil physical properties based on GIS and geo-statistical methods in the red beds of the Nanxiong Basin, China. *Polish Journal of Environmental Studies*, 28(4), 2961–2972. <https://doi.org/10.15244/pjoes/92245>
- Yang, C., Liu, N., & Zhang, Y. (2019). Soil aggregates regulate the impact of soil bacterial and fungal communities on soil respiration. *Geoderma*, 337(October 2018), 444–452. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.10.002>



# Dinámica y almacenamiento hídrico en un suelo con rasgos redoximórficos del valle interandino tropical: implicaciones del umbral estructural en condiciones de endosaturación

## Water dynamics and storage in a soil with redoximorphic features of the tropical inter-Andean valley: implications of the structural threshold under endosaturation conditions

Oscar Eduardo Trujillo Obando<sup>1✉</sup>, Enrique Alejandro Torres Prieto<sup>1</sup>, Armando Torrente Trujillo<sup>2✉</sup>

<sup>1</sup>Universidad Nacional de Colombia sede Palmira.

<sup>2</sup>Universidad Surcolombiana – CENIGAA



Vol. 54 (1 y 2) de 2024 | pp: 68 - 76 | ISSN 0562-5351 E-ISSN 2665-6558 | REC.: 20/03/2026 - ACEP.: 28/03/2026

### RESUMEN

En valles interandinos tropicales, suelos con alto potencial de fertilidad suelen presentar severas limitaciones físicas, químicas y en consecuencia biológicas. Este estudio caracterizó la dinámica y el almacenamiento hídrico de un suelo con rasgos redoximórficos en el Valle del Cauca (Colombia) para comprender las restricciones de su umbral estructural sometido a condiciones de endosaturación. Se evaluó la estratigrafía, mineralogía de arcillas (DRX), retención hídrica (modelo de Van Genuchten), dinámica freática - piezométrica y conductividad hidráulica saturada (KSat) bajo precipitación bimodal. Los resultados muestran una transición abrupta: un epipedón de matriz superficial arcillosa (0-60 cm), dominada por cloritas expansivas que inducen sellamiento, superpuesta por un horizonte subsuperficial conformado de depósitos arenosos. El modelo de Van Genuchten evidenció alta porosidad a saturación ( $\theta_s = 0.596 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ), pero una lámina de agua aprovechable críticamente estrecha ( $0.1819 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ). El hidropereodo reveló rápidos ascensos freáticos en condiciones ántraquicas en los primeros 40 cm, colapsando la KSat. Se confirma una "paradoja hidromórfica", donde el potencial químico es restringido por la rápida asfixia radicular. En conclusión, el manejo agronómico exige ineludiblemente implementar drenaje subsuperficial para desbloquear la productividad.

**Palabras clave:** Dinámica Agua-suelo, nivel freático del suelo, modelo de Van Genuchten, hipoxia radicular, drenaje agrícola.

### ABSTRACT

In tropical inter-Andean valleys, soils with high fertility potential often exhibit severe physical, chemical, and consequently biological limitations. This study characterized the dynamics and water storage of a soil with redoximorphic features in the Cauca Valley (Colombia) to understand the restrictions of its structural threshold under endosaturation conditions. Stratigraphy, clay mineralogy (XRD), water retention (Van Genuchten model), phreatic-piezometric dynamics, and saturated hydraulic conductivity (KSat) were evaluated under bimodal rainfall. The results show an abrupt transition: a clay surface epipedon (0-60 cm), dominated by expansive chlorites that induce sealing, overlain by a subsurface horizon composed of sandy deposits. The Van Genuchten model showed high porosity at saturation ( $\theta_s = 0.596 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ), but a critically narrow available water layer ( $0.1819 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ). The hydroperiod revealed rapid rises in the water table under antraquial conditions in the first 40 cm, collapsing the KSat. This confirms a "hydromorphic paradox," where the chemical potential is restricted by rapid root asphyxiation. In conclusion, agronomic management inevitably requires the implementation of subsurface drainage to unlock productivity.

**Keywords:** Soil-water dynamics, water table, Van Genuchten model, root hypoxia, agricultural drainage.

## INTRODUCCIÓN

Los valles interandinos tropicales, particularmente el Valle Geográfico del río Cauca en Colombia, representan zonas de alta importancia agrícola debido a la génesis de sus suelos sobre abanicos y terrazas aluviales de materiales finos. En estas regiones, la interacción entre una geomorfología de relieves planos a plano-cóncavos y un régimen de precipitación bimodal condiciona la presencia de suelos con régimen de humedad ácuico (IGAC-CVC, 2021; Malagón Castro, 2003). Estos sistemas, clasificados taxonómicamente bajo el suborden de los *Aqualf*, presentan procesos patogenéticos dominados por la lixiviación de arcillas y la segregación de óxidos, lo que deriva en la formación de horizontes argílicos con severas restricciones al drenaje interno (Soil Survey Staff, 2014).

A pesar de que estos suelos suelen ser catalogados como de alta fertilidad química, debido a su elevada saturación de bases y pH cercanos a la neutralidad, en la práctica agrícola emerge la denominada “paradoja del hidromorfismo”. Esta se manifiesta cuando el potencial productivo se ve truncado no por la disponibilidad de nutrientes, sino por limitaciones físicas estructurales que afectan el intercambio gaseoso en la rizosfera (Chen et al., 2024). El fenómeno de la gleización, evidenciado por rasgos redoximórficos (moteaduras y empobrecimientos cromáticos), no es solo un indicador de saturación temporal, sino el reflejo de una dinámica hidro-estructural compleja donde la conductividad hidráulica saturada ( $K_{Sat}$ ) se ve comprometida por la disposición de la matriz arcillosa en presencia de arcillas tipo 2:1 y 1:1, como cloritas y caolinitas, seguida en profundidad por una matriz arenosa constituida de cuarzo, granos alterados y fragmentos líticos en

más del 70% bajo condiciones de saturación (Marín-Pimentel et al., 2023).

Las investigaciones previas en estos ambientes se han centrado mayoritariamente en la respuesta agronómica de cultivos de ciclo corto o perennes, relegando a un segundo plano la caracterización profunda de la física del suelo como un sistema dinámico (Cruz V & Arias, 2015; FEDECACAO, 2015). Existe un vacío de conocimiento respecto a cómo el “umbral estructural”, entendido como el punto crítico donde la porosidad de aireación desciende por debajo del límite biológico funcional, fluctúa en respuesta a la oscilación intraanual del nivel freático en suelos *Mollic Endoaqualf* y *Udic Haplustert*. En estos suelos, la superposición de capas texturalmente contrastantes puede configurar sistemas parcialmente confinados, donde el almacenamiento hídrico no depende únicamente de la capacidad de campo teórica, sino de la presión de poros y el flujo preferencial (Chen et al., 2024; Pollacco, 2008).

La gestión sostenible de estos suelos requiere una comprensión detallada de su comportamiento hidrofísico para evitar procesos de degradación por sellado o compactación inducida bajo condiciones de exceso de humedad (Buritica et al., 2025). Por lo tanto, el presente estudio se fundamenta en la necesidad de caracterizar la arquitectura del perfil y su dinámica freática con implicaciones al sistema productivo agrícola. El objetivo principal es determinar la relación entre las propiedades hidrofísicas y la variabilidad del nivel freático, evaluando cómo la composición mineralógica y la configuración morfológica del perfil definen el umbral de almacenamiento hídrico y las limitaciones de aireación en un contexto de variabilidad climática interandina.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### 2.1 Localización y condiciones agroclimáticas.

La investigación se llevó a cabo en una unidad experimental de 3600 m<sup>2</sup> ubicada en la granja de la Federación Nacional de Cacaoteros (Fedecacao), Valle del Cauca (04°10'33.97" N; 76°12'19.90" W), a una altitud de 950 msnm. El área se sitúa en una terraza aluvial de relieve plano (pendiente < 2%), bajo un clima cálido seco con precipitación media de 1177 mm anuales y régimen bimodal, con picos de lluvia en los periodos marzo-mayo y septiembre-noviembre (Trujillo-Obando et al., 2023).

### 2.2 Caracterización pedológica y mineralógica.

En la taxonomía del suelo se reconoció como *Mollic Endoaqualf*, caracterizado por un régimen de humedad altamente variable udico-ácuico y condiciones de hidromorfismo subsuperficial. La caracterización morfológica se realizó mediante una calicata de 2.0 x 2.0 x 1.5 m, siguiendo los protocolos del Soil Survey Staff (2014) manual para la descripción de horizontes, color (tablas Munsell), estructura y rasgos redoximórficos. La composición mineralógica de la fracción arcilla se determinó mediante Difracción de Rayos X (DRX) en muestras orientadas, identificando la presencia de cloritas y caolinitas que condicionan el comportamiento hidro-estructural del perfil (IGAC, 2006).

### 2.3 Propiedades hidrofísicas y modelo de retención.

Se colectaron muestras disturbadas y núcleos de volumen conocido en cada horizonte genético para determinar la granulometría (método del hidrómetro de Bouyoucos), densidad aparente (método del cilindro), densidad real (picnómetro) y porosidad total (Tabla 1). Se determinó el contenido de agua

volumétrico ( $\theta$ ) a diferentes tensiones (0.1, 0.3, 1, 3, 5, 10 y 15 bar) utilizando ollas y platos de presión. Los datos se ajustaron al modelo de Van Genuchten (1980) mediante la ecuación:

$$\theta(h) = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + (\alpha h)^n]^m} \quad \text{Ec. 1}$$

donde  $\theta_s$  y  $\theta_r$  son los contenidos de agua saturado y residual, y  $\alpha$ ,  $n$ ,  $m$  son parámetros de ajuste de la forma de la curva.

### 2.4 Monitoreo de la dinámica freática y variabilidad estratigráfica.

Para comprender la arquitectura subsuperficial que condiciona el drenaje, se realizó un levantamiento estratigráfico en 9 puntos distribuidos espacialmente en el lote, mediante barrenadas hasta 100 cm de profundidad. En cada punto se describió la transición textural, el color y la presencia de rasgos redoximórficos. Complementariamente, se determinó la conductividad hidráulica saturada ( $K_{\text{Sat}}$ ) in situ en estos puntos para establecer la permeabilidad de la matriz del suelo (CENICAÑA, 1995). La fluctuación del nivel freático se monitoreó mediante cuatro baterías piezométricas con tubos de PVC a 40, 80 y 120 cm de profundidad, cuyas lecturas semanales se correlacionaron con la precipitación *in situ* (estación Campbell Scientific).

### 2.5 Análisis de datos y soporte estadístico.

El comportamiento hidro-estructural se modeló ajustando los datos de retención de humedad al modelo de (Van Genuchten, 1980). La variabilidad espacial de la estratigrafía y la  $K_{\text{Sat}}$  se analizaron mediante estadística descriptiva (media, desviación estándar y coeficiente de variación) para identificar la heterogeneidad del perfil, mientras que la dinámica freática se evaluó mediante un análisis descriptivo temporal de la variabilidad freática en respuesta a los pulsos pluviométricos del régimen bimodal.

**Tabla 1.** Propiedades del suelo, parcela experimental FEDECACAO.

Variables	Unidades	0–20 cm	20–40 cm
Propiedades Físicas			
Densidad Aparente (DA)	g cm <sup>-3</sup>	1.15	1.12
Densidad Real (DR)	g cm <sup>-3</sup>	2.54	2.54
Porosidad Total (n)	cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup>	0.55	0.56
Capacidad de Campo (CC)	cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup>	0.36	0.35
Punto de Marchitez Permanente (PWP)	cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup>	0.26	0.26
Agua aprovechable (AWC)	cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup>	0.1	0.09
Textural Class	–	FARL	ArL
Propiedades Químicas			
pH	–	6.54	6.91
Conductividad Eléctrica (CE)	dS m <sup>-1</sup>	0.21	0.15
Materia Orgánica (MO)	%	2.11	1.4
Porcentaje de Sodio Intercambiable (PSI)	%	0.32	0.43
Saturación de bases	%	90.95	>95
Fosforo (P)	mg kg <sup>-1</sup>	19.71	13.56
Potasio (K <sup>+</sup> )	cmol <sup>(+)</sup> kg <sup>-1</sup>	0.39	0.43
Sodio (Na <sup>+</sup> )	cmol <sup>(+)</sup> kg <sup>-1</sup>	0.1	0.12
Calcio (Ca <sup>2+</sup> )	cmol <sup>(+)</sup> kg <sup>-1</sup>	15.81	15.25
Magnesio (Mg <sup>2+</sup> )	cmol <sup>(+)</sup> kg <sup>-1</sup>	11.83	14.74
Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC)	cmol <sup>(+)</sup> kg <sup>-1</sup>	30.93	28.16
Azufre (S)	mg kg <sup>-1</sup>	25.9	Nd
Boro (B)	mg kg <sup>-1</sup>	1.16	Nd
Cobre (Cu)	mg kg <sup>-1</sup>	21.39	Nd
Manganeso (Mn)	mg kg <sup>-1</sup>	66.16	Nd
Hierro (Fe)	mg kg <sup>-1</sup>	65.74	Nd
Zinc (Zn)	mg kg <sup>-1</sup>	3.25	Nd

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 3.1 Arquitectura estratigráfica y pedología.

La génesis del perfil evaluado evidencia una alta heterogeneidad litológica espacial, característica inherente a los depósitos aluviales del Valle del Cauca (IGAC, 2004; Malagón, 2006). El levantamiento estratigráfico (Figura 1) reveló una transición textural abrupta que define el comportamiento

hidrodinámico del sistema. En los primeros 30 cm dominan texturas finas (arcillosas a arcillo-limosas), las cuales transicionan hacia materiales franco-arcillosos (30-40 cm) y franco-arcillo-arenosos (40-60 cm), hasta interceptar depósitos de arena a partir de los 60-70 cm de profundidad. Esta superposición de estratos contrastantes explica la severidad del régimen transicional udico al ácuico diagnosticado. La presencia de un lecho arenoso subyacente a una matriz arcillosa

genera un rompimiento de la capilaridad y una marcada anisotropía vertical, limitando la percolación profunda y favoreciendo la formación de un nivel freático colgado temporal. Esta dinámica reductiva es consistente con

los hallazgos de Michael J. Vepraskas et al. (2006) en suelos hidromórficos, y se confirma mediante la presencia de matrices 10YR4/2 y 10YR5/3, acompañadas de gleización y moteados en los horizontes Btg y Bg.

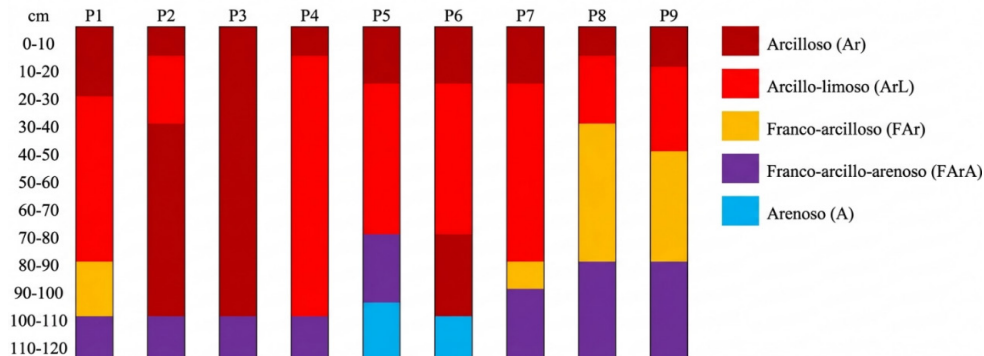


Figura 1. Distribución vertical de características por perfil (P1–P9)

Desde la perspectiva mineralógica, aunque el esqueleto del suelo cuenta con un 38% de cuarzo en la fracción arena, el comportamiento hidro-estructural está gobernado por la fracción arcilla. El análisis de difracción de rayos X (DRX) indicó un dominio absoluto de cloritas (tipo 2:1:1) seguido de caolinitas (tipo 1:1). La predominancia de cloritas justifica la alta capacidad de intercambio catiónico ( $30.93 \text{ cmol}^+ \cdot \text{kg}^{-1}$ ) observada. Sin embargo,

tal como lo reportan autores como Dixon & Weed (1989) para arcillas con componentes expansivos, esta mineralogía promueve un severo sellamiento estructural bajo condiciones de saturación. Este fenómeno explica las bajas tasas de conductividad hidráulica saturada ( $K_{\text{Sat}}$ ) registradas *in situ* (Figura 2) y la ineficiencia del sistema para evacuar los excesos hídricos gravitacionales tras los eventos de precipitación.

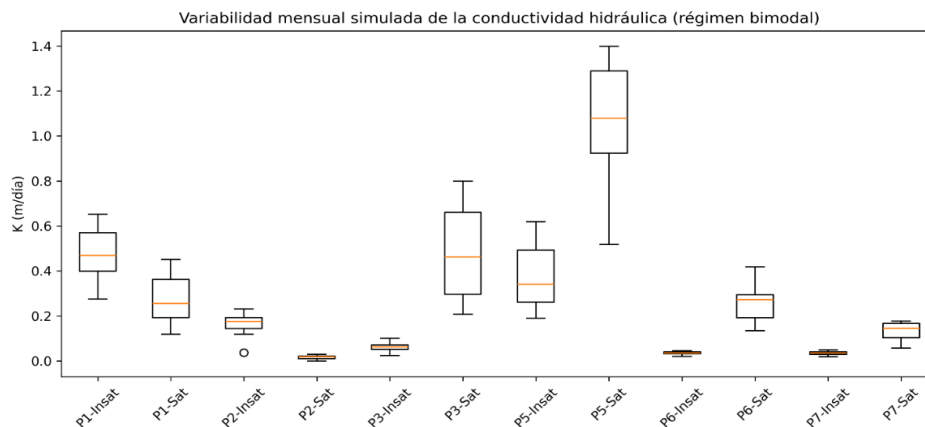


Figura 2. Variabilidad mensual de la conductividad hidráulica saturada (régimen bimodal)

### 3.2 Retención hídrica y caracterización del umbral estructural.

La dinámica de retención hídrica en el horizonte superficial (Figura 3) evidencia

físicamente la “paradoja hidromórfica” del perfil. El ajuste de la curva de desorción al modelo de Van Genuchten (1980) para el horizonte superficial arrojó un contenido de

humedad a saturación ( $\theta_s$ ) de  $0.596 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ . Aunque este alto volumen poroso total sugiere teóricamente un ambiente físico favorable, los parámetros de forma de la curva ( $n = 2.4256$  y  $m = 0.0459$ ) y el valor de entrada de aire ( $\alpha = 0.6253 \text{ cm}^{-1}$ ) revelan

un comportamiento hidrodinámico restrictivo. Estos índices indican un vaciado rápido de la escasa macroporosidad estructural a bajas tensiones, seguido de una retención hídrica severa gobernada por la matriz microporosa.

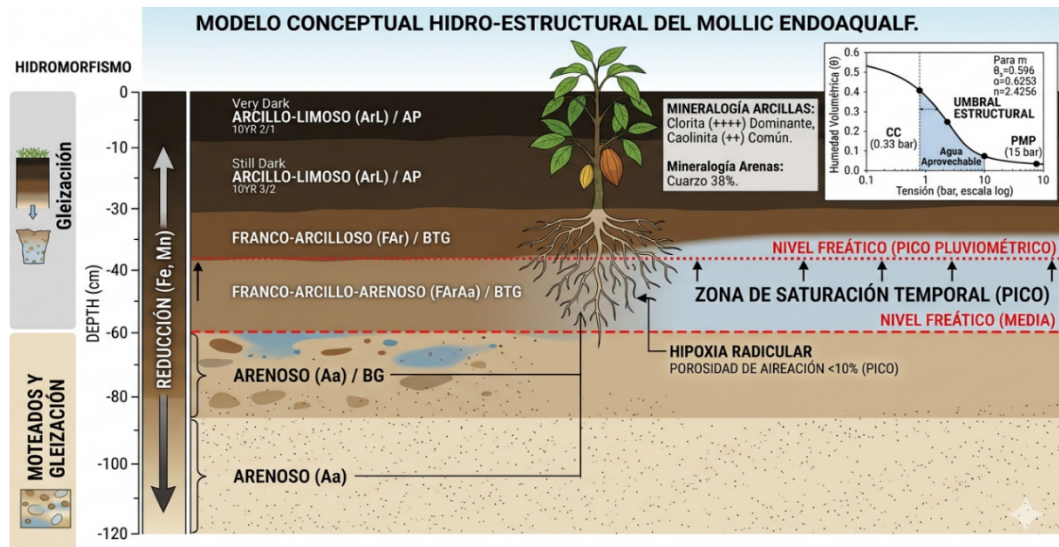


Figura 3. Modelo conceptual hidro-estructural del suelo

En términos funcionales, el suelo retiene  $0.4036 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$  a capacidad de campo (0.33 bar) y  $0.2217 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$  en el punto de marchitez permanente (15 bar), configurando una lámina de agua aprovechable sumamente estrecha ( $0.1819 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ). Este reducido margen define el umbral estructural del *Mollic Endoaqualf*. A pesar de su alta porosidad total, el acomodo laminar de las cloritas y la dominancia de microporos provocan que, ante lluvias moderadas, la porosidad de aireación descienda rápidamente por debajo del límite crítico del 10% (Grable & Siemer, 1968; Rabot et al., 2018), induciendo condiciones de hipoxia radicular mucho antes de que el nivel freático aflore a la superficie. Este comportamiento concuerda con lo descrito por Reynolds et al. (2002) y Dexter (2004) para suelos con texturas finas y arcillas de alta actividad, donde la calidad física se ve comprometida por una distribución porosa desbalanceada. La fuerte retención de humedad a tensiones altas (>15 bar) ratifica la influencia de la vasta superficie

específica de las arcillas tipo 2:1 reportadas en la mineralogía. En consecuencia, durante los periodos de transición climática, las raíces deben ejercer un gasto energético excesivo para la absorción hídrica o, por el contrario, enfrentarse a una rápida asfixia, lo que limita severamente la expresión del alto potencial químico (fertilidad) del suelo.

### 3.3 Dinámica freática, conductividad hidráulica y respuesta climática.

La interacción entre el régimen pluviométrico bimodal y la arquitectura restrictiva del perfil determina el hidroperiodo del suelo. El monitoreo piezométrico continuo evidenció un sistema hidrodinámico altamente sensible a los pulsos de precipitación. Durante los periodos de transición y baja precipitación, el nivel freático base se estabiliza a una profundidad de entre 60 y 80 cm, sostenido por el acuífero libre que descansa sobre los depósitos arenosos subyacentes (>100

cm). Sin embargo, durante los picos del régimen bimodal (marzo-mayo y septiembre-noviembre), se registra un ascenso abrupto del nivel freático, el cual intercepta sistemáticamente los piezómetros de 40 cm, saturando la zona de mayor actividad biológica radicular.

Este comportamiento de “ascenso rápido y abatimiento lento” está intrínsecamente ligado a la permeabilidad de la matriz del suelo. La evaluación de la conductividad hidráulica saturada ( $K_{Sat}$ ) *in situ* a través de los meses demuestra que la capacidad de transmisión de agua del suelo colapsa bajo regímenes continuos de lluvia. Los bajos valores de  $K_{Sat}$  (que descendieron drásticamente de 58 mm/h en periodos de transición a prácticamente 0 mm/h en la época lluviosa máxima) en los primeros 40 cm (horizontes Ap y Btg) actúan como un cuello de botella hidráulico: la tasa de infiltración de las precipitaciones supera la capacidad de percolación profunda del perfil, generando la recarga instantánea de los macroporos que ya venían limitados, tal como se demostró en el modelo de Van Genuchten. Desde una perspectiva edafológica, este escenario configura un hidropedón de anaerobiosis prolongada. Autores como Faulkner y Patrick (1992) y M. J. Vepraskas et al. (2006) señalan que en suelos con horizontes argílicos (tipo *Aqualfs*), la oscilación freática somera no solo inhibe el intercambio de oxígeno, sino que altera termodinámicamente el suelo, desencadenando la reducción de hierro y manganeso (gleización). En la práctica, el umbral estructural del suelo es vulnerado; el drenaje natural es insuficiente para evacuar la lámina gravitacional en un tiempo biológicamente seguro (<48 horas), lo que explica por qué el alto potencial químico del suelo (fertilidad) no se traduce en productividad sostenida sin una intervención mecanizada de drenaje subsuperficial.

## CONCLUSIONES

La evaluación del suelo *Mollic Endoaqualf* confirma una “paradoja hidromórfica” en la terraza aluvial: a pesar de su excepcional potencial de fertilidad, su aptitud productiva está severamente restringida por una estratigrafía contrastante y una mineralogía dominada por cloritas expansivas. Esta configuración define un “umbral estructural” críticamente estrecho; aunque la porosidad total supera el 50%, la lámina de agua aprovechable es mínima, induciendo un agotamiento rápido del oxígeno en el suelo antes de que el nivel freático siquiera alcance la superficie.

Bajo el régimen pluviométrico bimodal interandino, el ascenso freático acelerado y el colapso de la conductividad hidráulica ( $K_{Sat}$ ) imponen un estrés fisiológico severo para especies perennes de sistema radicular sensible a la hipoxia, como el cacao (*Theobroma cacao* L.). Para viabilizar este tipo de sistemas productivos, la oscilación abrupta entre la saturación asfixiante y el déficit hídrico hace ineludible priorizar la implementación de drenaje subsuperficial y el manejo físico de la macroporosidad, por encima de los planes de fertilización tradicional.

## REFERENCIAS

- Buriticá, F., Vanegas, J. I. & Suárez, J. C. (2025). Influence of Soil Physical and Hydraulic Properties on Cacao Productivity Under Agroforestry Systems in the Amazonian Piedmont. *Agriculture (Switzerland)*, 15(18). <https://doi.org/10.3390/agriculture15181973>
- CENICAÑA. (1995). *El cultivo de la Caña en la zona Azucarera de Colombia* (C. Cassalet, J. Torres, & C. Echeverry, Eds.). [https://www.cenicana.org/pdf\\_privado/documentos\\_no\\_seriados/libro\\_el\\_cultivo\\_cana/libro\\_p3-394.pdf](https://www.cenicana.org/pdf_privado/documentos_no_seriados/libro_el_cultivo_cana/libro_p3-394.pdf)

- Chen, S., Wang, C., Shang, S., Mao, X. & Zhao, J. (2024). Dynamic and empirical methods for field capacity estimation in fine textured soils with a coarse interlayer. *Geoderma*, 449. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2024.117000>
- Cruz V, J. R. & Arias, Á. J. (2015). *Manejo eficiente del uso de la caña de azúcar* (Cenicafía, Ed.; 1st ed.). errtytuiu
- Dexter, A. R. (2004). Soil physical quality: Part I. Theory, effects of soil texture, density, and organic matter, and effects on root growth. *Geoderma*, 120(3), 201–214. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2003.09.004>
- Dixon, J. B. & Weed, S. B. (1989). *Minerals in Soil Environments* (Soil Science Society of America, Ed.; 2nd ed.).
- Faulkner, S. P. & Patrick, W. H. (1992). Redox processes and diagnostic wetland soil indicators in bottomland hardwood forests. *Soil Science Society of America Journal*, 56(3), 856–865. <https://doi.org/10.2136/sssaj1992.03615995005600030030x>
- FEDECACAO. (2015). *Guía técnica para el cultivo del cacao: Sexta edición*. <https://es.scribd.com/document/426619713/FEDECACAO-GUIA-TECNICA-2015-1-pdf>
- Grable, A. R. & Siemer, E. G. (1968). Effects of bulk density, aggregate size, and soil water suction on oxygen diffusion, redox potentials, and elongation of corn roots. *Soil Science Society of America Proceedings*, 32(2), 180–186.
- IGAC. (2004). *Levantamiento de suelos y zonificación de tierras del departamento del Valle del Cauca*.
- IGAC. (2006). *Métodos analíticos del laboratorio de suelos* (Instituto Geográfico “Agustín Codazzi” Subdirección Agrológica, Ed.; 6a ed).
- IGAC-CVC. (2021). *Levantamiento semidetallado de suelos del departamento del Valle del Cauca: escala 1:25.000*.
- Malagón Castro, D. (2003). Ensayo sobre tipología de suelos Colombianos - Énfasis en génesis y aspectos ambientales. *ACAD*, 27(104), 319–342. [https://www.accefyn.com/revista/Vol\\_27/104/319-341.pdf](https://www.accefyn.com/revista/Vol_27/104/319-341.pdf)
- Malagón, D. (2006). *Suelos de Colombia: Composición, génesis, clasificación y manejo*. Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo, Universidad Nacional de Colombia.
- Marín-Pimentel, G. E., Rueda-Saa, G. & Menjivar-Flores, J. C. (2023). Evaluation of physicochemical properties in agricultural soils on the flat and piedmont areas of Valle del Cauca, Colombia with emphasis on degradation. *Environmental Earth Sciences*, 82(157), 1–11. <https://doi.org/10.1007/s12665-023-10813-6>
- Pollacco, J. A. P. (2008). A generally applicable pedotransfer function that estimates field capacity and permanent wilting point from soil texture and bulk density. *Canadian Journal of Soil Science*, 8, 761–774. [www.nrcresearchpress.com](http://www.nrcresearchpress.com)
- Rabot, E., Wiesmeier, M., Schlüter, S. & Vogel, H. J. (2018). Soil structure as an indicator of soil functions: A review. *Geoderma*, 314, 122–137. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.11.009>
- Reynolds, W. D., Bowman, B. T., Drury, C. F., Tan, C. S. & Lu, X. (2002). Indicators of good soil physical quality: density and storage parameters. *Geoderma*, 110(2). [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(02\)00228-8](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(02)00228-8)

Soil Survey Staff. (2014). *Keys to Soil Taxonomy* (USDA-Natural Resources Conservation Service (NRCS), Ed.; 12th ed.).

Trujillo-Obando, Ó. E., Escobar, J. A. D. & Torres, E. A. (2023). Socio-economic aspects associated with water management in cocoa cultivation in Valle del Cauca, Colombia. *Acta Agronómica*, 72(4), 368–376. <https://doi.org/10.15446/acag.v72n4.113615>

Van Genuchten, M. T. (1980). A Closed-form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils. *Soil Science Society of America Journal*, 44(5), 892–898. <https://doi.org/https://doi.org/10.2136/sssaj1980.03615995004400050002x>

Vepraskas, M. J., Richardson, J. L. & Tandarich, J. P. (2006). Dynamics of redoximorphic feature formation under controlled ponding in a created riverine wetland. *Wetlands*, 26(2), 486–496. [https://doi.org/10.1672/0277-5212\(2006\)26\[486:DORFFU\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1672/0277-5212(2006)26[486:DORFFU]2.0.CO;2)



# Variabilidad espacial de propiedades físicas del suelo y respuesta inicial del banano (*Musa AAA* cv. Williams) en Urabá, Colombia

## Spatial Variability of Soil Physical Properties and Initial Response of Banana (*Musa AAA* cv. Williams) in Urabá, Colombia

Ramiro Ramírez Pisco<sup>1✉</sup>, Edna Ivonne Leiva Rojas<sup>1✉</sup>

<sup>1</sup>Universidad Nacional de Colombia sede Medellín.



Vol. 54 (1 y 2) de 2024 | pp: 77 - 83 | ISSN 0562-5351 E-ISSN 2665-6558 | REC.: 19/03/2026 - ACEP.: 28/03/2026

### RESUMEN

En la región de Urabá, Colombia, el cultivo de banano es un pilar fundamental de la economía local. Sin embargo, su producción enfrenta desafíos entre ellos el rendimiento asociado a la baja fertilidad del suelo, la alta incidencia de problemas patológicos y en general a un manejo standard de la nutrición del cultivo, sin considerar las particularidades de cada finca, lo que ha desembocado en dificultades económicas del sistema bananero. Para abordar el manejo integral del suelo, que es un aspecto fundamental, donde se analizan las relaciones hídricas, físicas y químicas con la nutrición del cultivo, se propone el estudio integral de los factores mencionados, desde una perspectiva espacio temporal, para encontrar una alternativa que estimule el crecimiento y la producción del banano con principios sostenibles mediante la implementación de sistemas de manejo de producción agrícola 3M, que es potenciador vegetal, con bioestimulante orgánico, enriquecido con los nutrientes requeridos en cada condición de suelo y cultivo.

**Palabras claves:** Cobertura vegetal, diversidad, oligoquetos, propiedades físicas del suelo.

### ABSTRACT

In the Urabá region of Colombia, banana production is a cornerstone of the local economy. However, its productivity faces several challenges, including yield limitations associated with low soil fertility, a high incidence of pathological problems, and, in general, the use of standardized crop nutrition practices that do not account for farm-specific conditions. This has led to economic constraints within the banana production system. To address integrated soil management—an essential aspect involving the interaction of soil water, physical, and chemical properties with crop nutrition—this study proposes a comprehensive assessment of these factors from a spatiotemporal perspective. The aim is to identify management alternatives that enhance banana growth and productivity under sustainable principles. This includes the implementation of 3M agricultural production management systems, consisting of a plant-enhancing approach based on organic biostimulants enriched with nutrients tailored to specific soil and crop conditions.

**Keywords:** Vegetation cover, diversity, oligochaetes, physical properties of the soil.

## INTRODUCCIÓN

El cultivo de banano (*Musa AAA* cv. Williams) en la región de Urabá, Colombia, constituye uno de los principales pilares de la economía regional y de las exportaciones agrícolas del país. Su sostenibilidad productiva enfrenta limitaciones asociadas a las condiciones físicas y químicas del suelo, las cuales restringen la dinámica del agua, la aireación y la disponibilidad de nutrientes, afectando directamente el crecimiento radical y el rendimiento del cultivo. Propiedades como la densidad aparente, la estabilidad estructural y la conductividad hidráulica han sido identificadas como determinantes en sistemas tropicales intensivos (Lal, 2004; Bronick & Lal, 2005; Bünemann et al., 2018).

El manejo del suelo en sistemas bananeros ha estado históricamente basado en esquemas generalizados de fertilización y prácticas agronómicas estandarizadas derivadas del avance tecnológico del cultivo. Estos enfoques no incorporan la variabilidad espacial de las propiedades del suelo ni las condiciones particulares de cada finca o lote, lo que limita la eficiencia en el uso de nutrientes y compromete la sostenibilidad del sistema productivo (Robertson et al., 2013; Zhang et al., 2002).

El manejo sitio-específico y la agricultura de precisión permiten optimizar el uso de insumos y mejorar la productividad mediante la integración de información espacial y temporal del suelo. La variabilidad espacial de propiedades físicas y químicas influye en la dinámica del agua y en la disponibilidad de nutrientes, condicionando la respuesta del cultivo (Cambardella et al., 1994; Goovaerts, 1998; McBratney et al., 2005; Mulla, 2013).

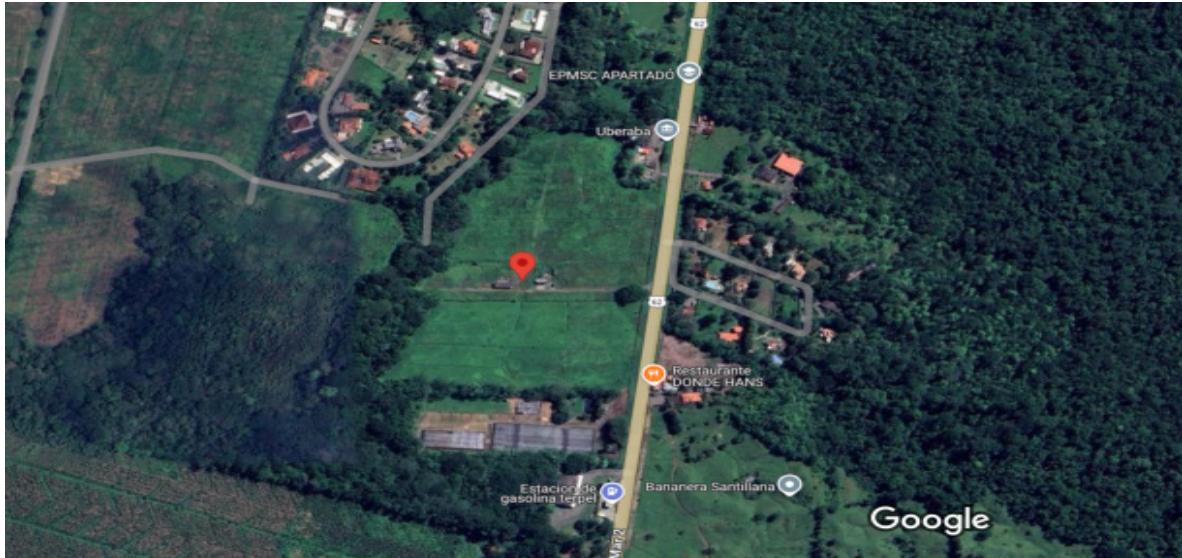
El manejo integral del suelo, entendido como la interacción entre sus propiedades físicas, químicas y biológicas, constituye un elemento

clave para mejorar la eficiencia de los sistemas productivos (Bünemann et al., 2018; Lehmann et al., 2020). En cultivos como el banano, donde el sistema radical depende de condiciones adecuadas de estructura, porosidad y disponibilidad hídrica, resulta fundamental comprender estas interacciones para diseñar estrategias de manejo más eficientes (Robinson & Galán Saúco, 2010).

La generación de información espacial detallada de los suelos permite sustentar la implementación de prácticas de manejo diferenciadas orientadas a optimizar el uso de recursos y mejorar la productividad del cultivo. La evaluación de enmiendas orgánicas enriquecidas con bioestimulantes, como Terra-Xue, se plantea como una alternativa para mejorar las propiedades físicas del suelo, estimular la actividad biológica y favorecer la disponibilidad de nutrientes en función de las condiciones específicas de cada sitio (du Jardin, 2015; Calvo et al., 2014). Este enfoque contribuye al desarrollo de sistemas de producción más sostenibles, basados en la comprensión de la variabilidad espacial del suelo y su relación con la respuesta del cultivo, promoviendo una agricultura más eficiente y adaptada a las condiciones locales.

## MATERIALES Y METODOS

El estudio se desarrolló en la región de Urabá, departamento de Antioquia, Colombia, en el Centro Experimental de Fitoplant, ubicado en el municipio de Apartadó (7°48'58.4" N, 76°39'05.2" W) en una área destinada para la producción de banano, en el cual se establecieron puntos de muestreo distribuidos en la zona de interés, con el fin de garantizar la representatividad en la recolección de muestras y la toma de datos de suelo en campo (Figura 1).

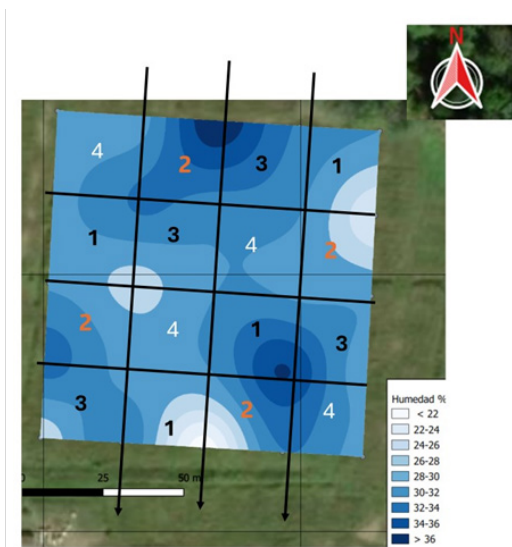


**Figura 1.** Zona de estudio, municipio de Carepa, Urabá Antioqueño.

Con base en los mapas de nivel freático y contenido de humedad del suelo, y considerando la ubicación de los canales de drenaje, se definió un espaciamiento de 25 m entre estos. Dentro de las parcelas se trazaron canales alternos para facilitar la evacuación del agua.

La preparación del suelo se realizó en cada sitio de siembra del cultivo de banano, donde se aplicó Terraxue en la dosis correspondiente según el tratamiento. Los tratamientos

evaluados fueron: T1 (300 g de cal + 60 g de sulfato de amonio + 1 kg de materia orgánica de palma), T2 (240 g de cal + 48 g de sulfato de amonio + 2 kg de Terraxue + 800 g de materia orgánica de palma), T3 (210 g de cal + 42 g de sulfato de amonio + 3 kg de Terraxue + 700 g de materia orgánica de palma) y T4 (150 g de cal + 30 g de sulfato de amonio + 5 kg de Terraxue + 500 g de materia orgánica de palma). Estos tratamientos correspondieron a niveles de fertilización convencional del 100 %, 80 %, 70 % y 60 %, respectivamente.



**Figura 2.** Distribución de tratamientos, con base en mapas de campo (Los números corresponden con el tratamiento aplicado).

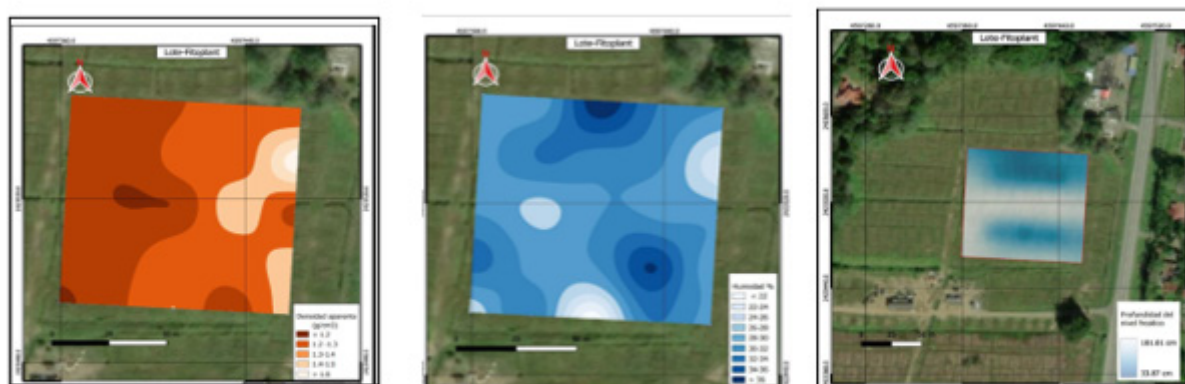
Los tratamientos se dispusieron en un diseño experimental de bloques grecolatinos correspondientes a 4 tratamientos con cuatro repeticiones (Figura 2). Cada parcela estuvo conformada por 50 plantas de banano, para un total de 800 plantas en el experimento.

La caracterización física del suelo incluyó la determinación de densidad aparente mediante el método del cilindro y densidad real por el método del picnómetro. La estabilidad de agregados se evaluó mediante el método de De Leenheer y De Boodt, modificado por Ramírez (2020). La porosidad total se estimó

como  $(1 - (d_a/d_r)) \times 100$ . La conductividad hidráulica se determinó mediante el método de laboratorio de cabeza constante. El coeficiente de expansión lineal (COEL) se determinó siguiendo la metodología del IGAC (2002) y la impedancia mecánica se evaluó utilizando un penetrómetro Eijkelkamp.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se construyeron las mapas de variabilidad espacial de densidad aparente (escala 1:750), humedad del suelo (escala 1:750) y nivel freático (escala 1:1500) (Figura 3).



Densidad aparente

Humedad del suelo

Nivel freático

**Figura 3.** Mapas de variabilidad espacial de densidad aparente (escala 1:750), humedad del suelo (escala 1:750) y nivel freático (1:1500).

Con base en los datos de distribución de esta variables se procedió al establecimiento del diseño experimental en campo.

La brotación del banano inició aproximadamente a los 40 días después de la siembra, y la emergencia fue evaluada a los 45 días. Se observó una menor brotación en los bloques 2, 3 y 4, lo que sugiere variabilidad espacial en las condiciones del ensayo (Tabla 1).

El tratamiento T4 presentó el mayor porcentaje promedio de brotación (63,5 %), seguido por T3 (62,0 %) y T1 (61,5 %), mientras

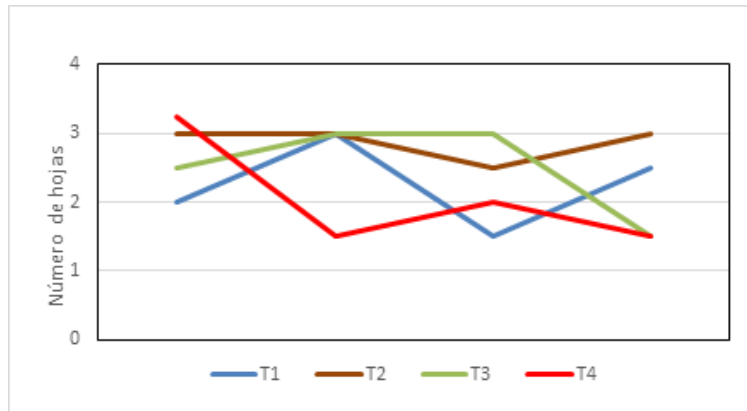
que T2 registró el valor más bajo (49,5 %). No obstante, estas diferencias no fueron estadísticamente significativas (Tabla 1). La desviación estándar evidenció una variabilidad moderada a alta, particularmente en T3 y T4, indicando una respuesta heterogénea entre repeticiones

### Numero de hojas

El número de hojas por planta osciló entre 2 y 3 hojas en promedio, sin diferencias significativas entre tratamientos. Sin embargo, el tratamiento T2 presentó menor variabilidad, lo que indica una mayor uniformidad en el desarrollo foliar (Figura 4).

**Tabla 1.** Porcentaje de brotación de banano Williams en cada tratamiento

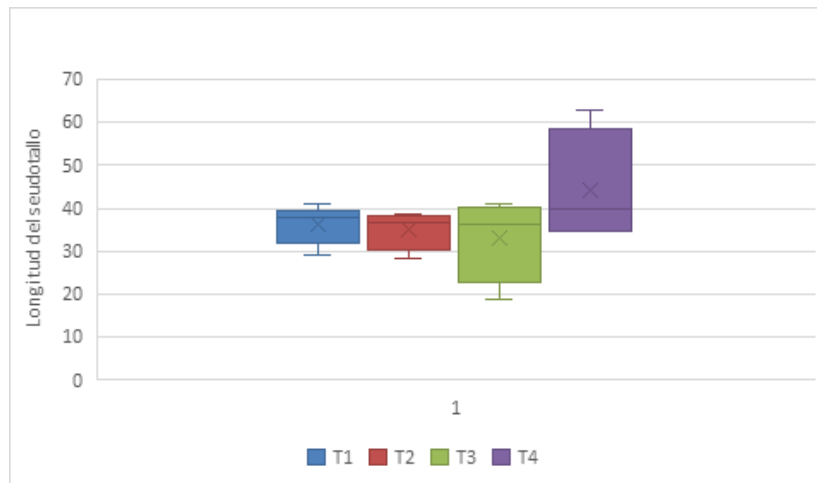
Tratamiento	T1	T2	T3	T4
	58	48	92	50
	86	58	54	54
	46	44	44	90
	56	48	58	60
Promedio	61,5	49,5	62	63,5
Dev Stdar	14,86	5,17	18,06	15,71



**Figura 4.** Distribución de tamaño de hojas durante la primera fase de crecimiento del banano

La longitud del seudotallo varió entre 19 y 67 cm. Aunque no se detectaron diferencias estadísticas significativas, este parámetro tiene alta relevancia agronómica, dado que el seudotallo constituye una reserva fundamental de foto asimilados para el desarrollo del

racimo. El valor máximo (67 cm) se registró en el tratamiento T4, evidenciando una respuesta destacada en este tratamiento, mientras que el tratamiento T2 mostró una tendencia a mayor uniformidad en el crecimiento (Figura 5).



**Figura 5.** Distribución de la longitud del tallo durante su primera fase de crecimiento del banano

## DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Los mapas de variabilidad espacial evidenciaron heterogeneidad en densidad aparente, humedad del suelo y nivel freático, condiciones que influyeron en la respuesta inicial del cultivo, particularmente en la brotación diferenciada entre bloques. Este comportamiento coincide con lo reportado por Cambardella et al. (1994), quienes destacan el efecto de la variabilidad edáfica sobre procesos biológicos y productivos a escala de campo.

Aunque no se detectaron diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos, el tratamiento T4 mostró una tendencia consistente a mayores valores de brotación (63,5 %) y longitud de seudotallo (67 cm), lo que sugiere condiciones más favorables para el establecimiento inicial. En contraste, T2 presentó menor variabilidad, indicando mayor uniformidad en el desarrollo, aspecto relevante para el manejo agronómico. La ausencia de diferencias significativas puede atribuirse a la etapa temprana del cultivo, donde la influencia de las propiedades físicas del suelo suele ser más determinante que los efectos de los tratamientos, especialmente en sistemas con alta variabilidad espacial (Bronick & Lal, 2005). Asimismo, la relación entre condiciones físicas del suelo y desarrollo del banano resalta la importancia de la estructura y disponibilidad hídrica en el crecimiento inicial del cultivo (Robinson & Galán Saúco, 2010). Estos resultados refuerzan la necesidad de implementar estrategias de manejo sitio-específico basadas en la variabilidad del suelo para optimizar el desempeño del cultivo.

## CONCLUSIONES

La variabilidad espacial de las propiedades físicas del suelo (densidad aparente, humedad y nivel freático) condicionó el establecimiento inicial del cultivo de banano, evidenciando

diferencias en la brotación entre bloques y confirmando la influencia de las condiciones edáficas a escala de lote.

No se detectaron diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos en las variables evaluadas durante la fase inicial; sin embargo, se identificaron tendencias agronómicas relevantes. El tratamiento T4 presentó los mayores valores de brotación y longitud de seudotallo, sugiriendo un efecto positivo sobre el crecimiento inicial, mientras que el tratamiento T2 mostró mayor uniformidad en el desarrollo, característica clave para la gestión agronómica.

La implementación de estrategias de manejo sitio-específico se plantea como una alternativa para optimizar la productividad y mejorar la eficiencia del sistema bananero en condiciones de alta variabilidad edáfica.

## BIBLIOGRAFIA


- Bronick, C. J., & Lal, R. (2005). Soil structure and management: A review. *Geoderma*, 124(1–2), 3–22. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2004.03.005>
- Bünemann, E. K., Bongiorno, G., Bai, Z., Creamer, R. E., De Deyn, G., de Goede, R., Fleskens, L., Geissen, V., Kuyper, T. W., Mäder, P., Pulleman, M., Sukkel, W., van Groenigen, J. W., & Brussaard, L. (2018). Soil quality – A critical review. *Soil Biology and Biochemistry*, 120, 105–125. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2018.01.030>
- Calvo, P., Nelson, L., & Kloepper, J. W. (2014). Agricultural uses of plant biostimulants. *Plant and Soil*, 383(1–2), 3–41. <https://doi.org/10.1007/s11104-014-2131-8>

- Cambardella, C. A., Moorman, T. B., Novak, J. M., Parkin, T. B., Karlen, D. L., Turco, R. F., & Konopka, A. E. (1994). Field-scale variability of soil properties in central Iowa soils. *Soil Science Society of America Journal*, 58(5), 1501–1511. <https://doi.org/10.2136/sssaj1994.03615995005800050033x>
- du Jardin, P. (2015). Plant biostimulants: Definition, concept, main categories and regulation. *Scientia Horticulturae*, 196, 3–14. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2015.09.021>
- Goovaerts, P. (1998). Geostatistics in soil science: State-of-the-art and perspectives. *Geoderma*, 89(1–2), 1–45. [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(98\)00078-0](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(98)00078-0)
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC). (2002). Métodos analíticos del laboratorio de suelos. IGAC.
- Lal, R. (2004). Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. *Science*, 304(5677), 1623–1627. <https://doi.org/10.1126/science.1097396>
- Lehmann, J., Bossio, D. A., Kögel-Knabner, I., & Rillig, M. C. (2020). The concept and future prospects of soil health. *Nature Reviews Earth & Environment*, 1, 544–553. <https://doi.org/10.1038/s43017-020-0080-8>
- McBratney, A. B., Whelan, B. M., Anece, T., & Bouma, J. (2005). Future directions of precision agriculture. *Precision Agriculture*, 6(1), 7–23. <https://doi.org/10.1007/s11119-005-0681-8>
- Mulla, D. J. (2013). Twenty five years of precision agriculture: Key advances and remaining knowledge gaps. *Biosystems Engineering*, 114(4), 358–371. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2012.12.001>
- Ramírez, R. (2016). Fertilidad integral: Actualización de la fertilidad del suelo. En Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo (Ed.), *Fertilidad integral* (pp. 41–56). Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo. ISBN: 978-958-8598-13-0
- Robinson, J. C., & Galán Saúco, V. (2010). Bananas and plantains (2nd ed.). CAB International. <https://doi.org/10.1079/9781845936587.0000>
- Robertson, M. J., Llewellyn, R. S., Mandel, R., Lawes, R., Bramley, R. G. V., Swift, L., Metz, N., & O'Callaghan, C. (2013). Adoption of variable rate fertiliser application in the Australian grains industry. *Field Crops Research*, 143, 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2012.12.014>
- Rosales, F. E., Pocasangre, L. E., Trejos, J., Serrano, E., Acuña, O., Segura, A., Delgado, E., Pattison, T., Rodríguez, W., & Staver, C. (2006). Guía para el diagnóstico de la calidad y la salud de suelos bananeros. En *Memorias XVII Reunión ACORBAT* (pp. 198–206).
- Vargas Castaño, Á. (2024). Efecto de las prácticas agronómicas del cultivo de banano (*Musa AAA*) sobre los indicadores de calidad y salud de los suelos en la región del Urabá antioqueño [Trabajo de grado]. Universidad de Córdoba. <https://repositorio.unicordoba.edu.co/handle/ucordoba/8064>
- Zhang, N., Wang, M., & Wang, N. (2002). Precision agriculture A worldwide overview. *Computers and Electronics in Agriculture*, 36(2–3), 113–132. [https://doi.org/10.1016/S0168-1699\(02\)00096-0](https://doi.org/10.1016/S0168-1699(02)00096-0)



# Degradación y calidad del suelo Panorama regional en el norte del departamento del Huila

## Soil Degradation and quality Regional overview in the north of the Huila department

Armando Torrente-Trujillo<sup>1</sup> , Hugo Leonardo Aristizabal-Martelo<sup>2</sup>

<sup>1</sup>M. Sc y Doctor Ciencias Agrarias. Universidad Surcolombiana.

<sup>2</sup>Magister en Ingeniería y Gestión Ambiental. Universidad Surcolombiana.



Vol. 54 (1 y 2) de 2024 | pp: 84 - 95 | ISSN 0562-5351 E-ISSN 2665-6558 | REC.: 5/08/2025 - ACEP.: 18/10/2025

### RESUMEN

La degradación del suelo en el norte del Huila es un problema que afecta la calidad del suelo y sus funciones ecosistémicas. La erosión, la salinización, la compactación, la contaminación y la desertificación son los procesos que más inciden en la degradación, y su monitoreo son esenciales para la gestión sostenible de los suelos. Es necesario implementar estrategias y programas permanentes de monitoreo y seguimiento espacio-temporales de la degradación de suelos y tierras; hoy se reconocen los avances en la formulación de protocolos y la determinación del estado actual de la degradación de los suelos en el país. En el presente escrito se hace una revisión cuyo enfoque central es la degradación del suelo, denotando la importancia de evaluar y promover el estudio de los procesos que inciden en los suelos de la región norte del departamento del Huila, que incluye ecosistemas estratégicos de gran interés como son el desierto de la Tatacoa, el Parque Natural Nacional Nevado del Huila y otras áreas relevantes con afectación antrópica en el departamento. A partir de la información obtenida se define una serie de conceptos verificables en la zona referenciada, se consultan algunos métodos para evaluar los procesos de degradación, entre otros elementos que contribuyen a comprender la problemática del uso del suelo. Se pretende incentivar el interés de caracterizar y cuantificar los procesos de degradación que ocurren en el suelo, identificando su estado actual en el norte del Huila con miras a formular correctivos y planes de mitigación, acogiendo los principios del desarrollo sustentable y sostenible. Se aborda una visión amplia de la problemática asociada al uso del suelo, reconociendo que los pobladores del territorio, son agentes activos y dinámicos en los procesos de conservación o degradación.

**Palabras clave:** Suelo, Calidad del suelo, degradación, Norte del Huila, Uso del suelo.

### ABSTRACT

Soil degradation in the north of Huila is a problem that affects soil quality and its ecosystem functions. Erosion, salinization, compaction, contamination, and desertification are the processes that most influence degradation, and their monitoring is essential for sustainable soil management. It is necessary to implement permanent strategies and programs for spatial-temporal monitoring and tracking of soil and land degradation; today, progress is recognized in the formulation of protocols and the determination of the current state of soil degradation in the country. This document provides a review whose central focus is soil degradation, highlighting the importance of evaluating and promoting the study of the processes that affect the soils of the northern region of the Huila department, which includes strategic ecosystems of great interest such as the Tatacoa Desert, the Nevado del Huila National Natural Park, and other relevant areas with anthropic impact in the department. Based on the information obtained, a series of verifiable concepts in the referenced area are defined, some methods to evaluate degradation processes are consulted, among other elements that help to understand the problem of land use. The aim is to encourage interest in characterizing and quantifying degradation processes occurring in the soil, identifying their current state in northern Huila with a view to formulating corrective measures and mitigation plans, adhering to the principles of sustainable development. A broad vision of the issues associated with land use is addressed, recognizing that the inhabitants of the territory are active and dynamic agents in the processes of conservation or degradation.

**Keywords:** Soil, Soil quality, Degradation, Northern Huila, Land use.

## INTRODUCCIÓN

El suelo es un recurso esencial para la vida y la prolongación de la existencia sobre la tierra, además es el soporte básico de la humanidad y otros seres vivos, en él se sustenta la mayor parte de las necesidades de los diferentes organismos. Los conceptos del suelo son tan variados como las actividades humanas que en él se desarrollan, entre otros se mencionan, un medio para el desarrollo de las plantas, fragmentos de rocas intemperizadas, un cuerpo natural organizado, protector del ambiente, etc. (Garavito, 2023). El Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MinAmbiente, 2016) en su Política Nacional para la Gestión Integral Ambiental del Suelo (GIAS), definió el suelo como sistemas complejos y dinámicos, que se constituyen en un componente fundamental del ambiente, que cumple múltiples funciones y servicios eco-sistémicos vitales para la supervivencia humana y las relaciones sociales.

Es preciso como referencia definir el termino calidad del suelo, como la capacidad del suelo para cumplir sus funciones, que incluye atributos como fertilidad, productividad potencial, sostenibilidad y calidad ambiental (Bautista Cruz, 2004), asociando de esta manera calidad del suelo, con la salud del mismo; otros autores como Wilson, M. G. et al, (2000), Rodríguez, N. et al,(2009), Campitelli, P. et al, (2010), Meza Aliaga, M. & Castro Correa, C., (2013), Pla Sentis (2013), toman en consideración a Doran & Parkin (1994) como a Karlen y col. (1997), quienes definen la calidad del suelo como esa capacidad que él mismo posee para sostener una productividad biológica, funcionando dentro de los límites del ecosistema, manteniendo la calidad del ambiente y promoviendo la salud de plantas y animales. En la calidad del suelo se inducen las características intrínsecas que el suelo posee (físicas, químicas y biológicas) de las cuales depende la fertilidad del ecosistema o

agro-ecosistema al que pertenecen (Ferrera Cerrato, R., & Alarcón, A., 2015).

La calificación inversa a la calidad es la degradación; Nachtergaele et al (2009) citado por Pulido y Bocco (2011) define la degradación desde una perspectiva global que implica la reducción de la capacidad que posee la tierra para proveer de bienes y servicios de los ecosistemas y asegurar sus funciones sobre un periodo de tiempo para sus beneficiarios; proponiendo así, el tema de los bienes y servicios que el suelo posee, lo cual depende de las características anteriormente mencionadas. La degradación del suelo puede considerarse un proceso que generalmente está inducido por el hombre y que disminuye la capacidad actual y/o futura para sostener la vida humana; el termino degradación es muy recurrente relacionarlo a procesos de origen antrópico, debido entre otras causas, al crecimiento y expansión de las ciudades que ocasiona un fuerte deterioro de la salud e integridad de los ecosistemas (Cram et al., 2008); de esta manera, algunas regiones son mayormente susceptibles a la presión antrópica debido a sus características naturales (Navone y Palacín, 2004), adicionalmente, la degradación se relaciona con el régimen climático, las condiciones geomorfológicas y las características intrínsecas de los suelos, pero sobre todo con la deforestación, el establecimiento de sistemas agrarios inapropiados y el impacto que causan las políticas públicas en el medio ambiente (Espinosa Ramírez, 2011).

La Convención de las Naciones Unidas para la Lucha contra la Desertificación (UNCCD, 1994), define la desertificación como la degradación de tierras que ocurre en zonas secas, para lo cual Dregne & Chou (1992) determinan que dichas zonas son tierras con un índice de aridez entre 0,05 y 0,65, y comprenden las tierras áridas, semiáridas y subhúmedas secas, pero excluyen las hiper-



Institutos Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) y el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), que incluye la cobertura en las áreas de bosque y no bosque en los años recientes.

Se hace una revisión en referencias bibliográficas relacionadas con los métodos para la evaluación de la degradación del suelo, métodos que permiten hacer el debido seguimiento y monitoreo a las áreas de interés, la estimación de los procesos e intensidades de afectación a la calidad de los suelos, estos permitirán establecer planes y programas de protección, y recuperación. Además, se revisan algunas normas que regulan la protección del suelo y finalmente, se hace un análisis a manera de reflexión de la importancia de los ecosistemas estratégicos y los potenciales procesos degradativos en el norte del Huila.

## RESULTADOS Y ANÁLISIS

### 1. Métodos para la evaluación de la degradación del suelo

Existen diversos métodos para la evaluación de la degradación de tierras y/o desertificación, los cuales están diseñados para propósitos diferentes, bajo conceptualizaciones diversas y salvo en contextos participativos, en función de los problemas que perciben los especialistas (Pulido y Bocco, 2011); estos autores describen los principales atributos de los métodos de evaluación de la degradación de tierras más usuales. Con base en estos y en la información obtenida de las referencias originales es posible revisar los alcances, limitaciones y potencialidades de los diversos métodos disponibles.

El uso de indicadores o índices para evaluar la calidad del suelo ha tenido auge en los últimos años, La integración coherente y cuantitativa de índices parciales de calidad del suelo, de vegetación y de clima e indicadores

edáficos, vegetales y microbianos (Costa et al, 2002), se consideran válidos y efectivos como estrategia para evaluar el estado de un área de interés. Con un enfoque integral se examinan las características de la cobertura vegetal, se identifican propiedades del suelo y otros factores que determinan la calidad o la degradación, para lo cual también se pueden emplear opiniones de expertos y conocimiento de los habitantes de la zona.

En su desarrollo social, el hombre ha mantenido una constante interacción con la naturaleza, obteniendo mediante sus acciones los recursos que ésta le brinda para satisfacer sus necesidades de alimento, abrigo y muchas otras. Pese a que el suelo se forma en un largo proceso evolutivo en el que intervienen el clima, los seres vivos y la roca más superficial de la litosfera, que se meteoriza y se fragmenta formándolo (De la Rosa, 2010), el hombre sigue ejerciendo presión sobre dicha evolución ocasionando como respuestas estados de degradación.

Bautista et al, 2004 soportado por la OECD 1993, establece esta relación como “presión-estado-respuesta”, el cual se basa en una cadena de causalidades donde se entiende que las actividades humanas originan presiones sobre el ambiente (indicadores de presión) que modifican la calidad y cantidad de los recursos naturales (indicadores de estado), en virtud de lo cual se produce una respuesta que tiende a modular la presión (indicadores de respuesta). En Colombia la Política para la gestión de este recurso, previamente citada (GIAS), utilizó una metodología similar para el diagnóstico de la problemática, el modelo es conocido como Fuerzas Motrices – Presión – Estado – Impacto – Respuesta (F-P-E-I-R), y así formular las políticas para la gestión sostenible del suelo en Colombia (MinAmbiente, 2016). Con la implementación de esta política se puede garantizar una efectiva evaluación de la calidad y la

degradación del suelo en diferentes tipos de ecosistemas, fomentando el estudio sobre la zona enfatizada, lo cual debe surgir a partir de la riqueza informativa sobre los procesos que ocurren en los suelos.

## 2. Normativa sobre el recurso suelo

Es necesario conocer la normatividad que rige en el país relacionada con el recurso suelo. En la Constitución de 1991(artículo 8), establece la protección de las riquezas naturales de la

Nación como principio guía de la actuación del Estado y los particulares: “Es obligación del Estado y de las personas proteger las riquezas culturales y naturales de la Nación”. A su vez el artículo 80, agrega el deber de prevenir y controlar los factores de deterioro ambiental, imponer las sanciones legales y exigir la refacción de los daños causados (Correa Restrepo & Silva Arroyave, 2009), a partir de estos principios se promueve el cuidado del medio ambiente y de los recursos naturales (tabla 1).

**Tabla 1.** Normatividad relacionada al recurso suelo de mayor interés

<b>Marco normativo sobre el recurso suelo</b>	
Decreto 2811 de 1974 parte VII	Se refiere al suelo agrícola y de los usos no agrícolas de la tierra.
Ley 9 de 1993	En los artículos 136 a 144, se regula lo relativo a su transporte, almacenamiento, uso, comercio y distribución, estableciendo normas para la salvaguarda de la salud.
Decreto Reglamentario 2462 de 1989	Relacionado con la explotación de materiales de construcción.
Ley 388 de 1997, Artículo 33	Ordenamiento territorial, que reglamenta los usos del suelo.
Decreto 2655 de 1988	Código de Minas.
Decreto 1843 de 1991	Reglamenta el uso, el manejo de plaguicidas y otras disposiciones sobre el tema.

**Fuente:** Elaboración propia

## 3. Degradación del suelo en el norte del Huila y su análisis

El paisaje fisiográfico del norte del departamento del Huila es el resultado de la modelación terrestre producto de los sucesivos eventos climáticos, labrando los cauces naturales y sus afluentes que surcan el territorio desde sitios de mayor elevación en las laderas distales y el piedemonte limítrofe de las cordilleras oriental y central, y que fluye hacia el valle interandino, escurriendo y sedimentando las superficies con dirección al colector mayor de aguas superficiales y subsuperficiales, como es el vaso receptor del río Magdalena.

El clima bimodal característico del norte del departamento define en su sector extremo norte, periodos prolongados de sequía precedidos de periodos cortos de lluvia de gran intensidad pluviométrica, lo que induce un alto potencial de erosividad, sumado a la condición granulométrica de las fracciones minerales del sustrato superficial terrestre que determinan un alto potencial de erodabilidad, estas fuerzas que operan simultáneamente conducen a efectos degradativos de fuerte impacto sobre el territorio, constituyendo una infinidad de geformas erosionadas (surquillos, terracetas, geocolumnas en sucesión, agujas, mesetas, faldones, cajas de agua, etc.), y variedad de colores matizados por los procesos de oxido-reducción de las

rocas y los minerales intemperizados, que impactan a simple vista y cautivan a los turistas, se observan entre otros, los grises, rojizos, amarillentos, verdosos, blanquecinos, etc., denotando un paisaje muy contrastado tanto en relieve como en coloración, con un ambiente biofísico cubierto de especies vegetales de plantas C4 del orden de las crasuláceas o xerofíticas que resisten estas condiciones drásticas de vida, y los caprinos o chivos que pastorean en estas áreas del “desierto de la Tatacoa” (figura 2).

Los procesos degradativos del suelo por actividad antrópica de la agricultura intensiva en el monocultivo de arroz, sistema productivo tradicional en el norte del Huila, impacta las áreas de los distritos de riego San Alfonso, El Porvenir y el Juncal que son beneficiados con aguas del Rio Magdalena y sus tributarios;

también las tierras de Llanogrande en Campoalegre beneficiada con aguas del Rio Neiva, así mismo otras áreas del territorio norte del departamento en los municipios de Aipe, Villavieja, Tello, Baraya, Colombia, Neiva, Palermo, Yaguará, Rivera, etc. Se han identificado y evaluado procesos de degradación como consecuencia de prácticas de labranza intensiva que causa la rotura y la destrucción de las estructuras del suelo (González-Pedraza et al, 2024), alterando los suelos estructurales a suelos texturales, que son sujetos posteriormente a procesos de encostramiento y sellamiento superficial como consecuencia de la dispersión de la fracción coloidal y la pérdida de materia orgánica del suelo que limita el normal flujo de infiltración y el desplazamiento del frente húmedo en profundidad hacia la zona de raíces (figura 2).



**Figura 2.** Desierto de la Tatacoa, Distrito de Riego el Juncal y páramo Nevado del Huila

Las prácticas de mecanización intensiva conllevan a la formación de los pie de arados o rastra que causan adensamiento y compactación del suelo a escasa profundidad, generalmente 35 cm, limitando la exploración radical de los cultivos y restringiendo la posterior implementación de otras especies; así mismo el creciente proceso de salinización como consecuencia de prácticas de sobre riego y mal drenaje con incidencia en el ascenso capilar de sales en profundidad, estos procesos no se monitorean y son ocultos en la toma de decisiones. Hay que resaltar el mayor impacto que afecta tanto a los recursos como a las comunidades del sector agrícola, y son los procesos de contaminación, debido al paquete tecnológico

utilizado con la gran diversidad de insumos agroquímicos (herbicidas, nematicidas, fungicidas, insecticidas, acaricidas, etc.) en las dos campañas de arroz cuyo ciclo aproximado es de 135 días, así mismo la diversidad de productos fertilizantes de síntesis química que alteran la naturaleza del suelo y su hábitat. Los agricultores asumen estas prácticas para el control de vectores asociados al ataque y daño al cultivo, buscando proyectar el máximo sus rendimiento y producción.

El norte del Huila, además se destaca por su riqueza minera, que incluye entre otros minerales, la producción de fosfatos y calcáreos. Estos minerales son esenciales para la producción de fertilizantes y

correctores de suelos, y tienen un potencial significativo para aumentar la productividad agropecuaria y mejorar los suelos en regiones como la altillanura colombiana. Las múltiples actividades de explotación minera en esta región del país, especialmente las asociadas con explotación a cielo abierto son de gran impacto degradativo por las técnicas tradicionales con cargas explosivas y la remoción masal, el traslado y la depositación de rocas y materiales minerales (dolomitas, calcitas, fosforitas, serpentinas, otros), como el uso de metales pesados para la depuración y extracción de metales preciosos. La minería ilegal ha sido un factor significativo en este problema, con operaciones que han resultado en la captura de personas e incautación de maquinaria, así como la remoción de tierras y la eliminación de árboles. La explotación minera degrada el suelo principalmente por la contaminación con metales pesados, la pérdida de fertilidad y la alteración física del terreno, lo que afecta la biodiversidad y la salud de las comunidades cercanas (Angarita y Gómez, 2023). Esta problemática es especialmente visible en áreas inclusive en las que se practica minería legal, donde los ecosistemas sufren erosión, deforestación y contaminación de aguas.

Los principales impactos de la minería en el suelo son la contaminación química por la acumulación de metales pesados (arsénico, plomo, mercurio) que reducen la calidad del suelo como también causa la alteración del pH y la pérdida de nutrientes esenciales para la agricultura. La degradación física por concepto de la erosión a causa de la remoción de capas superficiales y la compactación del terreno por maquinaria pesada, que disminuye la capacidad de infiltración de agua. La alteración ecológica por pérdida de biodiversidad vegetal y animal, como la fragmentación de hábitats y la reducción de la cobertura forestal, además del consecuente impacto social por prácticas de minería

con riesgos para la salud de comunidades cercanas por exposición a contaminantes, la disminución de la productividad agrícola y pérdida de medios de vida. Según Carlos A. Cante P., Presidente Ejecutivo de la Federación de Productores de Carbón – Fenalcarbon en el foro “Huila, territorio de oportunidades” (17 junio del 2025), el Huila en materia minera, tiene potencial en la producción de otros tantos minerales como oro, tungsteno, cobre, arcillas, y hasta emanaciones de uranio, pero se requiere todo un conjunto de acciones en materia económica, financiera, social y ambiental, para convertir esos recursos naturales en reservas, evitando los procesos antrópicos de la degradación y pérdida de la calidad del suelo e implementando planes y acciones para su mitigación, restauración y recuperación. La degradación del suelo por minería es un problema multidimensional que combina factores ambientales, sociales y económicos. Las estrategias de control deben dirigirse a la regulación y el monitoreo de la actividad minera, invertir en restauración ecológica y promover alternativas económicas sostenibles para reducir la presión sobre los ecosistemas.

Hacia el norte del Huila, especialmente en los municipios de Aipe y Neiva se concentran los campos petroleros más activos, que se han consolidado como un polo clave de producción de hidrocarburos en Colombia, con Ecopetrol proyectando inversiones de más de 512 millones de dólares entre 2025 y 2028 para ampliar la explotación en campos como Dina-Terciarios y Palogrande. La decisión forma parte de la estrategia Ecopetrol 2040: Energía que Transforma (Ecopetrol, 2024). Los procesos de explotación petrolera impactan el recurso suelo, principalmente por derrames, la acumulación de residuos tóxicos y la deforestación asociada a la actividad extractiva. Estos impactos reducen la fertilidad, contaminan los ecosistemas y afectan directamente a comunidades rurales.

Los principales impactos sobre el suelo son la contaminación química por derrames de crudo y filtraciones de aguas de producción que liberan hidrocarburos y metales pesados. Estos contaminantes alteran la composición química del suelo, disminuyendo su capacidad de retener nutrientes y agua. La compactación y erosión por el tránsito de maquinaria pesada y la construcción de infraestructura (carreteras, plataformas) que compactan el suelo y la pérdida de cobertura vegetal facilita la erosión, reduciendo la capa fértil, la deforestación y pérdida de biodiversidad. La apertura de áreas para exploración y extracción implica tala de bosques que elimina la protección natural del suelo y altera ciclos ecológicos y ecosistemas hídricos. La contaminación del suelo se transfiere a ríos y quebradas cercanas, afectando la calidad del agua y la fauna acuática.

Es de resaltar, la importancia estratégica del sector petrolero con sus reservas y la sostenibilidad energética para la reposición anual de reservas de crudo y condensados, contribuyendo a la energía nacional con impacto económico regional por dinamización de servicios, empleos y regalías para los municipios y el departamento. Como retos ambientales a considerar por sus impactos sobre el medio natural están asociados a su cercanía al río Magdalena y los ecosistemas sensibles que requieren de estrictos controles ambientales. Además, las implicaciones sociales por la preocupación de las comunidades sobre el impacto a los recursos agua, suelo agrícola y salud poblacional.

Otra causa de la degradación de los suelos en el Huila se relaciona con las prácticas de pastoreo extensivo y ganaderías sin control que terracean las vertientes y laderas, y en áreas planas adensan y compactan el suelo. El pastoreo cuando se realiza sin control es una de las principales causas de degradación de los suelos, generando erosión, pérdida

de fertilidad y desertificación, tal como lo plantean Mora Marín et al, 2017; la clave para evitarlo está en aplicar prácticas de manejo planificado como son la rotación de potreros y la implementación de sistemas silvopastoriles. El problema principal es el sobrepastoreo, es decir, el consumo excesivo de la vegetación antes de que pueda recuperarse, con consecuencias directas en la erosión del suelo, la compactación, la pérdida de nutrientes y finalmente la desertificación, perdiendo los suelos su capacidad productiva. El sobrepastoreo reduce la biodiversidad y afecta la fauna asociada y conlleva a la degradación del suelo con disminución directa a su capacidad de retención hídrica, aumentando el riesgo de sequias e inundaciones y finalmente impacta negativamente la economía rural.

El manejo inadecuado del pastoreo es una actividad que en diversas zonas se convierte en una causa directa de la degradación del suelo (Cuellar, Eligia de la C. et al, 2015). Las causas de la degradación del suelo son las directas y subyacentes (Geist & Lambin, 2004; Pulido & Bocco, 2011), para ellos las causas directas corresponden a la deforestación, el conflicto en el uso de la tierra y el inadecuado manejo agrícola de la tierra, además se incluyen las políticas ambientales inadecuadas y la pobreza. Las estrategias para mitigar este proceso están asociadas al pastoreo rotacional con división de potreros y recuperación de los pastos, ajustar el número de cabezas de ganado a la capacidad de carga del terreno y la integración de sistemas silvopastoriles para mejorar la fertilidad del suelo. Se sugiere hacer revegetación con especies forrajeras resistentes y nativas para la recuperación de las áreas degradadas, como la planificación del uso del suelo con la incorporación de prácticas de conservación.

Un factor que incide sobre el uso del suelo y las comunidades, es el relacionado con

la alteración y violación de los Planes de Ordenamiento Territorial (POT) para cambiar el uso del suelo de áreas agrícolas hacia urbanismo, fenómeno que se ha intensificado en varias regiones de Colombia, y trae consigo consecuencias profundas tanto en lo ambiental como en lo social y económico, como ocurre hoy en el municipio de Palermo, causando conflictos en el uso del suelo en áreas destinadas a la producción agropecuaria para permitir la construcción de urbanizaciones, cuyos núcleos poblacionales son expuestos a cargas contaminantes e impactos ambientales por actividades agropecuarias o agroindustriales.

En el Huila, se han dado procesos de expansión urbana sobre suelos agrícolas de alta productividad. Esto ha generado debates sobre la sostenibilidad de los POT y la necesidad de proteger las llamadas “áreas de reserva agrícola” para garantizar la seguridad alimentaria nacional (Gobernación del Huila, 2024). Se plantean algunas alternativas de manejo como son las zonas de protección agrícola, correspondiendo a definir áreas intocables dentro de los POT, el urbanismo compacto que busca promover densificación en zonas ya urbanizadas en lugar de expandirse sobre áreas rurales, además los planes de desarrollo rural que integra la planificación urbana con estrategias de fortalecimiento agrícola y la participación comunitaria en las cuales debe incluirse a campesinos y organizaciones locales en la toma de decisiones. En síntesis, modificar los POT para urbanizar suelos agrícolas puede traer beneficios económicos inmediatos, pero compromete la seguridad alimentaria, la sostenibilidad ambiental y la cohesión social a largo plazo.

Las consecuencias principales del cambio de uso del suelo comprenden desde lo ambiental, la pérdida de suelos fértiles, la fragmentación de ecosistemas que

interrumpen los corredores biológicos y la afectación de la biodiversidad, mayor riesgo de inundaciones, residuos sólidos y aguas residuales en zonas antes rurales, y los aspectos sociales por el desplazamiento de comunidades campesinas, el conflicto por el territorio y el cambio cultural por debilitamiento de las formas de vida campesina. Desde lo económico, hay beneficios para inversionistas por el incremento del valor del suelo, e impactos negativos por la dependencia alimentaria al reducir la producción local y el crecimiento urbano desordenado, que genera costos elevados en infraestructura, servicios públicos y movilidad.

En el noroccidente del departamento se localiza del Nevado del Huila, cuyos suelos y sus alrededores se caracterizan por ser altamente frágiles debido a la actividad volcánica, la pendiente pronunciada y la presión antrópica (agricultura, ganadería y deforestación). Aunque es una zona protegida dentro del Parque Nacional Natural Nevado del Huila, enfrenta riesgos de erosión, pérdida de fertilidad y deslizamientos. En el contexto geográfico y ambiental el Nevado del Huila se ubica en la Cordillera Central de los Andes en área limítrofe con los departamentos de Cauca y Tolima, cubriendo aproximadamente 163.842 hectáreas con una elevación máxima de 5364 msnm (Parques Nacionales Naturales de Colombia, 2026), la mayor altura del cordón andino colombiano. El suelo predominante corresponde al orden de los andisoles, con alta fertilidad inicial pero muy susceptible a la erosión y degradación si se pierde la cobertura vegetal. En áreas circundantes se ha dado la deforestación para actividades de agricultura y ganadería. Los procesos de degradación denotados son la compactación por ganadería extensiva, la expansión agrícola en laderas inadecuadas, la tala y quema que reducen la capacidad de retención hídrica del suelo (figura 2).

Las consecuencias de la degradación desde el punto de vista ambiental son la pérdida de la biodiversidad, el riesgo a inundaciones y deslizamientos en los municipios circundantes de Páez, Iquira y Santa María, y consecuencias sociales como la vulnerabilidad de comunidades campesinas e indígenas frente a posibles desastres naturales, la reducción de la productividad agrícola en suelos erosionados; y desde el punto de vista económico, los costos elevados en recuperación de tierras y atención a emergencias, como la disminución de la oferta hídrica para riego y el consumo humano. Las estrategias de conservación y manejo de esta área de páramo son la reforestación con especies nativas, para recuperar cobertura y proteger el suelo, la implementación de sistemas silvopastoriles para reducir la presión ganadera y mejorar la fertilidad, la restricción de expansión agrícola para evitar cultivos en pendientes pronunciadas y suelos frágiles, la educación ambiental comunitaria que involucra a campesinos e indígenas en la gestión sostenible, y el monitoreo geológico y ambiental.

### REFLEXIONES FINALES

La región norte del departamento del Huila posee una riqueza ecosistémica de gran importancia, su variedad climática y de cobertura vegetal son contrastantes con los procesos degradativos que operan allí. Esta región posee ecosistemas estratégicos altamente vulnerables, aunque sus suelos son muy variados desde los aridsoles hasta los andisoles con distinto grado de fertilidad, la combinación de presión humana y riesgos naturales los hace propensos a la degradación. La clave está en fortalecer la protección de estas áreas estratégicas, la gestión comunitaria y la planificación territorial para garantizar su sostenibilidad.

La evaluación de la degradación del suelo puede realizarse a través de diversas metodologías que combinan enfoques globales y locales, utilizando indicadores específicos para medir la salud y funcionalidad del suelo. Estas metodologías son los soportes esenciales para desarrollar estrategias de manejo y restauración efectivas que permitan implementar políticas direccionadas de mitigación y manejo en búsqueda de la conservación y restauración del suelo.

Es necesario adoptar políticas razonables en pro del desarrollo sustentable y sostenible, priorizando y garantizando así la sostenibilidad alimentaria actual y futura de esta región norte del Huila, reconocida por su gran potencial energético - minero, agropecuario y turístico por los variados y contrastantes ecosistemas estratégicos que posee su territorio.

### REFERENCIAS

- Angarita, G. y Gómez, L. (2023). La minería y su impacto económico y ambiental: desarrollo de los pasivos ambientales mineros en Colombia. *Revista Espacios*. Vol. 44 (02) 2023 • Art. 2. DOI: [10.48082/espacios-a23v44n02p02](https://doi.org/10.48082/espacios-a23v44n02p02)
- Bautista Cruz, A., E tchevers Barra, J., del Castillo, R.F., Gutiérrez, C. (2004). Calidad del suelo y sus indicadores. *Ecosistemas* 13 (2), 1-8.
- Campitelli, Paola, Aoki, Antonio, Gudelj, Olga, Rubenacker, Andrea, & Sereno, Roberto. (2010). Selección de indicadores de calidad de suelo para determinar los efectos del uso y prácticas agrícolas en un área piloto de la región central de Córdoba. *Ciencia del suelo*, 28(2), 223-231.
- Correa Restrepo, F. J., & Silva Arroyave, S. M. (2009). Análisis de la contaminación del suelo: Revisión de la normativa y posibilidades de regulación económica. *Semestre ecológico*, Vol 12x ISSN 0120-6346, 13-34.

Costa, M., Gutierrez, J. C., Juan Hernando, Isabel Hernando, Ana Martín, & Moreno, M. (2002). Indicadores edáficos, vegetales y microbianos de procesos de desertificación. *Anales de Biología* 24, 175-183.

Cram, S., Cotler, H., Morales, L. M., Sommer, I., & Carmona, E. (2008). Identificación de los servicios ambientales potenciales de los suelos en el paisaje urbano del Distrito Federal. *Investigaciones geográficas*, (66), 81-104.

Cuellar, Eligia de la C, Fresneda, C, Rivero, Caridad J, Thompson, Martha, Sánchez, Graciela, & González, Yudisney. (2015). Plan de manejo sostenible de tierra para la producción de leche en la UBPC Aguadita, Cienfuegos, Cuba. *Pastos y Forrajes*, 38(4), 448-456. Recuperado en 13 de mayo de 2016, de [http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0864-03942015000400009&lng=es&tlng=es](http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0864-03942015000400009&lng=es&tlng=es).

De la Rosa, D. (2010). Impactos del cambio climático sobre los suelos. *AMBIENTALIA: El Cambio Climático III Congreso Andaluz de Desarrollo Sostenible, VII Congreso Andaluz de Ciencias Ambientales*.

Doran, J.W. y Parkin, B.T. (1994). *Defining Soil Quality for a Sustainable Environment*. Soil Science Society of America, Inc. Special Publication. Number 35. Madison, Wisconsin, USA.

Dregne, H.E., Chou, N.T. (1992). Global desertification dimensions and costs. En Dregne HE (Ed.) *Degradation and Restoration of Arid Lands*. Lubbock Technical University). Lubbock, TX, EEUU. Recuperado de [www.ciesin.org/docs/002-186/002-186.html](http://www.ciesin.org/docs/002-186/002-186.html)

Ecopetrol, 2024. Grupo Ecopetrol lanza su visión estratégica 2040. Energía que transforma. <https://www.ecopetrol.com.co>

Epinosa Ramírez, M. E. (2011). Degradación de suelo por actividades antrópicas en el norte Tamaulipas, México. *Papeles de Geografía*, 77-88.

Ferrera Cerrato, R., & Alarcón, A. (2015). La microbiología del suelo en la agricultura sostenible. *CIENCIA ergo-sum*, 8(2), 175-183. Recuperado de <http://cienciaergosum.uaemex.mx/index.php/ergosum/article/view/3805/2857>

Figuroa C., Y. (2004). *Guía ilustrada de la Flora del desierto de La Tatacoa, Huila-Colombia*. Trabajo de grado. Instituto de Ciencias Naturales-Departamento de Biología, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional de Colombia (inédito). Bogotá.

Garavito Neira, F. (2023). *La Madre Tierra. Suelos, plantas, ambiente*. Sociedad Geográfica de Colombia. Academia de Ciencias Geográficas. Bogotá. 360p.

Geist HJ, Lambin EF (2004). Dynamic causal patterns of desertification. *BioScience* 54: 817-829.

Gobernación del Huila (2025). *Foro: Huila territorio de oportunidades*. Fenalcarbon. Carlos A. Cante. <https://www.bing.com>

Gobernación del Huila (2024). *Planes de Desarrollo municipios del Huila. 2024 - 2027*. <https://www.huila.gov.co/documentos/2167/planes-de-desarrollo-municipios-del-huila-2024-2027/>

González-Pedraza A. F., L. Torres, Leonides Castellanos (2024). Impacto de diferentes prácticas agrícolas sobre las características físicoquímicas del suelo: un análisis crítico. *Revista Ambiental Agua Aire y Suelo* 15(1):90–105. DOI:[10.24054/raaas.v15i1.2916](https://doi.org/10.24054/raaas.v15i1.2916)

IDEAM (2012). *Propuesta para la Gestión Integral Ambiental del Recurso Suelo*

(GIARS). Informe Final. Diagnóstico Nacional del Estado del Recurso Suelo. Convenio Interadministrativo entre el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (No. 160/11) y el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (No.015A/11).

IGAC (2014). Uso potencial y efectivo de la tierra agrícola en Colombia: resultados del Censo Nacional Agropecuario. <https://www.repository.fedesarrollo.org.co/handle/11445/4079?locale-attribute=en>

Meza Aliaga, Mónica, & Castro Correa, Carmen Paz (2013). Susceptibilidad erosiva asociada al proceso de reconversión agrícola productiva, cuenca semiárida de Quillota. V Región de Valparaíso, Chile. *Idesia (Arica)*, 31(4), 43-52. Recuperado en 07 de mayo de 2016, de [http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0718-34292013000400006&lng=es&tlng=es.10.4067/S0718-34292013000400006](http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-34292013000400006&lng=es&tlng=es.10.4067/S0718-34292013000400006).

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (2016). Política Nacional para la Gestión Integral Ambiental del Suelo (GIAS). Convenio Interadministrativo Número 25 de 2013, suscrito entre el MADS y la Universidad Nacional.

Mora Marín M. A., L. Ríos Pescador, L. Ríos Ramos y J. L. Almario Charry (2017). Impacto de la actividad ganadera sobre el suelo en Colombia. <https://doi.org/10.25054/issn.2216-1325>

Nachtergaele F, Biancalani R, Bunning S. (2009). The Land Degradation Assessment in Drylands (LADA) project 2009. En Im-Erb R, Niino Y, Sombatpanit S, Biancalani R (Eds.) 27-30/04/2009. pp. 7-15. Recuperado en 06 de mayo de 2016, de [www.fao.org/docrep/012/i1067e/i1067e00.htm](http://www.fao.org/docrep/012/i1067e/i1067e00.htm)

Navone, S. M., & Palacín, E. (2004). Identificación de la degradación/desertificación de las tierras en Santa María (Catamarca) a través del procesamiento de imágenes Radarsat. *Terra*, 18, 289-297.

OECD (1993). OECD Core Set of Indicators for Environmental Performance Reviews: A Synthesis Report by the Group on the State of the Environment. Environment Monograph, Organization for the Economic Co-Operation and Development, Paris.

Parques Naturales Nacionales de Colombia (2016). Recuperado el 11 de 05 de 2016, de <https://www.parquesnacionales.gov.co/PNN/portel/libreria/php/decide.php?patron=01.0118>

Parques Naturales Nacionales de Colombia (2026). Gov.co. Parque Nacional Natural Nevado del Huila. <https://www.parquesnacionales.gov.co/nuestros-parques/pnn-nevado-del-huila/>

Pla Sentis, I. (2013). Análisis crítico de la calidad de suelos y de sus indicadores. *Rev. Suelos Ecuatoriales*, ISSN-e 2665-6558, Vol. 43, N.º. 1, 2013, págs. 1-8

Pulido Secundino, J.; Bocco Verdinelli, G. (2011). ¿Cómo se evalúa la degradación de tierras? Panorama global y local. *Interciencia*, Febrero, 96-103.

Rodríguez, N, Florentino, A, Torres, D, Yendis, H, & Zamora, F. (2009). Selección de indicadores de calidad de suelo en tres tipos de uso de la tierra en la planicie de Coro, estado Falcón. *Revista de la Facultad de Agronomía*, 26(3), 340-361. Recuperado en 06 de mayo de 2016, de [http://www.scielo.org.ve/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0378-78182009000300003&lng=es&tlng=es](http://www.scielo.org.ve/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0378-78182009000300003&lng=es&tlng=es).

UNCCD (1994). United Nations Convention to Combat Desertification in countries experiencing serious drought and/or desertification, particularly in Africa. A/AC.24/1/27, Paris.

Wilson, M. G. (2000). Evaluación de atributos del suelo para su utilización como indicadores de calidad y sostenibilidad entre ríos. *Revista Facultad de Agronomía*, 23-30.

# SUELOS ECUATORIALES

Fundada en 1956

Volumen 54 No. 1 y 2 Año 2024

ISSN 0562-5251 versión Impresa

ISSN 2665-6558 versión en Línea

Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo (SCCS)



DOI: <https://doi.org/10.47864>



Afiliada a:  
Unión Internacional de la Ciencia del Suelo  
Sociedad Latinoamericana de la Ciencia del Suelo  
<https://www.sccsuelos.org/revista/>

