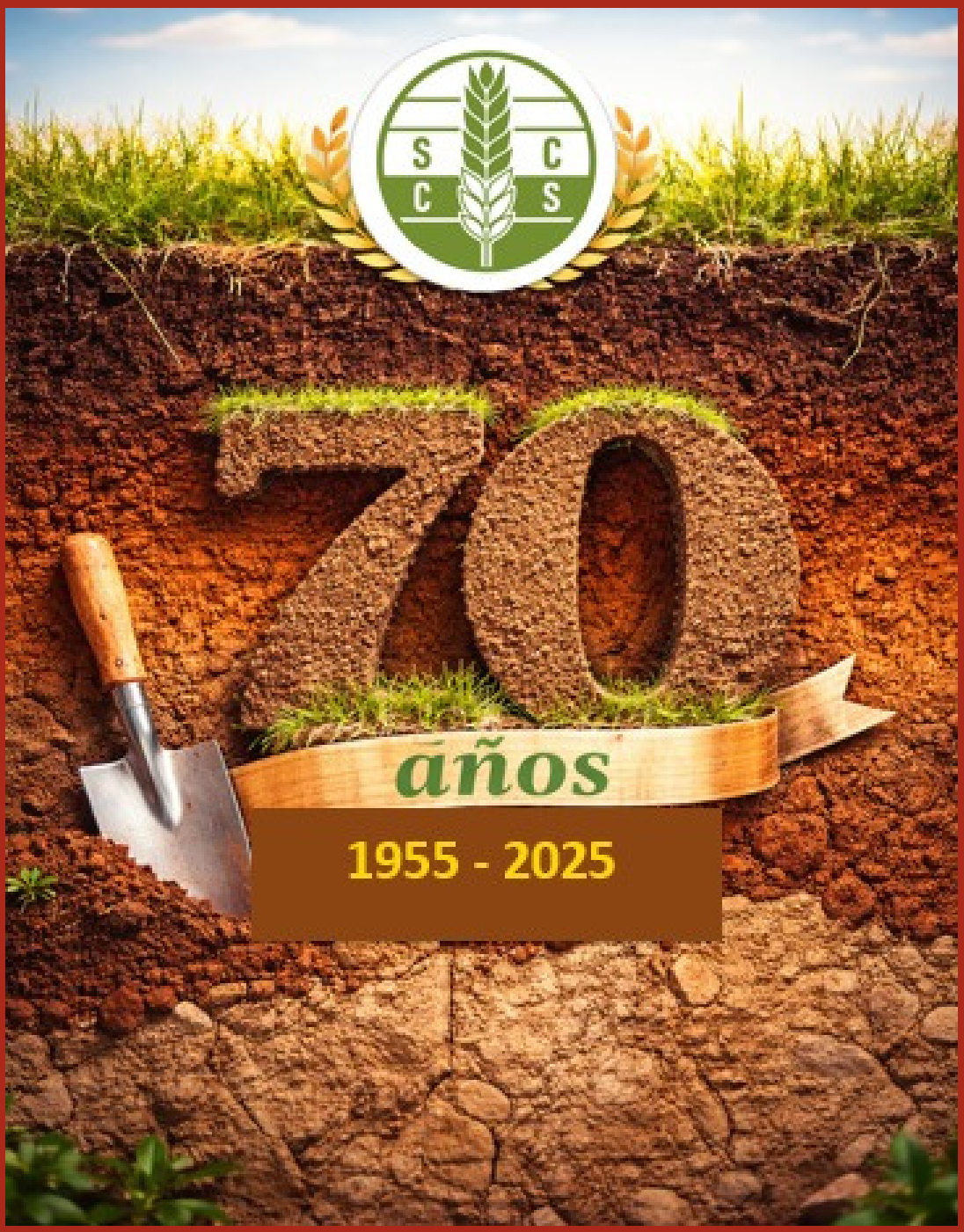
SUELOS ECUATORIALES

Fundada en 1956 Volumen 55 No. 1 y 2 Año 2025

ISSN 0562-5251 versión Impresa ISSN 2665-6558 versión en Linea

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

Fundada en 1956

ISSN 0562-5351 **ISSN-e** 2665-6558

Volumen 55 No. 1 y 2 Año 2025

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:

Carlos Alberto Escobar Chalarca, PhD. Universidad Nacional de Colombia sede Palmira, Harold Tafur Hermann, PhD. Universidad Nacional de Colombia sede Palmira, Guillermo López Pérez, PhD. Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo, Luis Fernando Cadavid López, MSc. Universidad Nacional de Colombia sede Palmira, Martha Constanza Daza Torres, PhD. Universidad del Valle, Hugo Ruiz Erazo PhD. Universidad de Nariño, Francisco E. Restrepo Higuita, MSc. Agrosilicium, Enrique Combatt Caballero, PhD. Universidad de Córdoba, María Angela Pinzon Pinto, MSc. Universidad de Cundinamarca, Leila Amparo Rojas PhD. Soc. Col. Ciencia del Suelo, Ramiro Ramírez Pisco, PhD. Universidad Nacional de Colombia sede Medellin, Jhony A. Benavidez Bolaños, PhD. Universidad del Valle, Hugo E. Castro, MSc. Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia -Tunja, Diego Iván Caviedes Rubio, PhD. Universidad Cooperativa de Colombia.

SOCIEDAD COLOMBIANA DE LA CIENCIA DEL SUELO

1955-2025

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 Higuita, 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 Higuita
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, scsuelo@gmail.com
Página Web: https://www.sccsuelos.org

SUELOS ECUATORIALES 55 (1 y 2), 2025
Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo

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 envió de manuscritos.

Página Web: http://www.sccsuelos.org
Página revista: https://www.sccsuelos.org/revista/
E-mail: 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

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, PhD. 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.

Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo

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

EDITORIAL

1955 – 2025, un periodo de 70 años, trasegados en el camino de la CIENCIA DEL SUELO; significa una generación desde que sus fundadores colocaron los cimientos de la denominada y conocida "SOCIEDAD COLOMBIANA CIENCIA DEL SUELO", que en su organización reúne una gran familia de científicos, académicos y demás miembros socios, para continuar construyendo la arquitectura de esta ciencia que escudriña y relaciona de manera transversal con la multiplicidad de ciencias de la tierra y humanas, en los propósitos de develar este precioso recurso esencial para la vida, el SUELO. Si, le debemos un gran reconocimiento a los gestores de los pilares, el Dr. Manuel del Llano y el equipo humano que participó en su creación, más aún resta un gran compromiso, cual es continuar con las nuevas generaciones, la construcción futurista y perfeccionada de esta organización científica en aras de identificar, reconocer, conservar, regenerar y potencializar la calidad y la salud del suelo, como fuente natural de múltiples productos y de sus servicios ecosistémicos esenciales derivados como son los relacionados con el sostenimiento, la regulación, el aprovisionamiento, los servicios escénicos y culturales en procura cada vez del bienestar de la humanidad y su entorno, la vida sana y en armonía con la naturaleza.

Este volumen 55 de la revista SUELOS ECUATORIALES, abre un espacio para reconocer nuestra organización y su trayectoria en los dos primeros artículos, con nuestras directrices en Colombia y Latinoamérica, se exalta y reconoce el ámbito de la Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo y la Sociedad Latinoamericana de la Ciencia del Suelo, sin desconocer los nexos con la Unión Mundial de la Ciencia del Suelo, de la cual somos participes activos a través de la representación y las dinámicas de los miembros directivos. Además, se incluyen, ocho artículos de revisión e investigación como aportes al conocimiento en la ciencia del suelo.

Reiteramos nuestro reconocimiento al esfuerzo y dedicación de los autores e investigadores que participan de este volumen 55, por la elaboración de sus artículos y permitir compartir estos con la comunidad en general, dando visibilidad a nuevos productos del conocimiento relacionados con el suelo y en general con la actividad productiva del sector agrícola.

SUELOS ECUATORIALES 55 (1 y 2), 2025
Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo

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 numero teléfonico. 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 Román, 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/ISIabbr/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
- Para libros: ZINCK J (2013) Geopedology. Elements of geomorphology for soil and geohazardstudies. 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; geoecology; geoarcheology; 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 footmark 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), as onthefollowing 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

Books: ZINCK J (2013) Geopedology. Elements of geomorphology for soil and geohazard studies. ITC Special Lecture Notes Series.

Symposiums, congress, bookchapters of severalauthors: 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.

SUELOS ECUATORIALES
Fundada en 1956
ISSN 0562-5351
ISSN-e 2665-6558
Volumen 55 No. 1 y 2 2025

Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo
1955-2025

Editorial: *Armando Torrente*

RESEÑA SOCIEDAD COLOMBIANA DE LA CIENCIA DEL SUELO **Review of the Colombian society of soil science** *Martha M. Bolaños Benavides, Leila Amparo Rojas Escobar.*	11-16
QUIÉNES SOMOS Y DE DÓNDE VENIMOS: HONOR A QUIEN HONOR MERECE **Who we are and where we come from: Honor to whom Honor is due** *Laura Bertha Reyes-Sánchez.*	17-23
TRANSFERENCIA DE CONOCIMIENTO AGRÍCOLA MEDIANTE SISTEMAS DE INTELIGENCIA ARTIFICIAL AGÉNTICA: UNA REVISIÓN **Agricultural Knowledge Transfer Through Agentic Artificial Intelligence Systems: A Review** *Edgar Leonardo Camero Ortiz.*	24-35
AGRICULTURA 5.0: INNOVACIÓN TECNOLÓGICA, CAPITAL HUMANO Y SOSTENIBILIDAD. REVISIÓN EXPLORATORIA **Agriculture 5.0 and Sustainable Soil Management: Technological Innovation and Human Capital. An Exploratory Review** *Yovany Ospina Nieto, Oscar Eduardo Trujillo Obando, Jhony Armando Benavides-Bolaños.*	36-51
PREDICCIÓN DE PROPIEDADES DEL SUELO MEDIANTE ESPECTROSCOPÍA VIS-NIR-MIR: AVANCES RECIENTES, OPORTUNIDADES Y DESAFÍOS **Prediction of Soil Properties Using Vis–NIR–MIR Spectroscopy: Recent Advances, Opportunities, and Challenges** *Jhony Armando Benavides-Bolaños, Oscar Eduardo Trujillo-Obando, Elizabeth Patricia Rosero-Cuastumal*	52-75
FERTILIZACIÓN INTEGRADA EN EL CULTIVO DEL ARROZ: UNA ALTERNATIVA SOSTENIBLE Y COMPETITIVA **Integrated Fertilization in Rice Cultivation: A Sustainable and Competitive Alternative** *Luis Armando Castilla lozano, Hayder Mauricio Ortiz, Yeimy Carolina Tirado*	76-86
HUELLA HÍDRICA Y SOSTENIBILIDAD DEL CULTIVO DE ARROZ EN EL DISTRITO DE RIEGO ASOJUNCAL **Water footprint and sustainability of rice cultivation in the ASOJUNCAL irrigation district** *Rafael Ricardo Davidson Montero, Armando Torrente Trujillo, Nilver Tovar Ospina, Angela Goretty García*	87-98
EFECTOS DE LAS ACTIVIDADES SOCIOECONÓMICAS SOBRE LAS PROPIEDADES FISICOQUÍMICAS DEL SUELO, EL MOTILÓN-LAGUNA DE LA COCHA	99-113

Effects of socioeconomic activities on the physicochemical properties of the soil, El Motilón-Laguna de la Cocha *Huertas Jenny, Escobar Sofia, Cuaspa Sofia, Coral-Paredes Eliana, Lafaurie Gabriel.*	
EL CAMBIO CLIMÁTICO Y SU INCIDENCIA EN LA PROPAGACIÓN DE LA PLAGA *CARMENTA FORASEMINIS* EN EL CULTIVO DE CACAO (*TEOBROMA CACAO* L.) **Climate change and its impact on the spread of the *Carmenta foraseminis* pest in cocoa cultivation (*Theobroma cacao* L.)** *Wilmer Valenzuela Molina, Armando Torrente Trujillo, Jorge Iván Chávarro Diaz.*	114-127
REMEDIACIÓN QUÍMICA DE SUELOS CONTAMINADOS EN AGUACHICA, CESAR POR EL APODERAMIENTO ILÍCITO DE HIDROCARBUROS **Chemical remediation of contaminated soils in Aguachica, Cesar due to the illicit appropriation of hydrocarbons** *Rosalina González Forero, Sergio Vélez Rey, Alejandro Islas García, Jhoan Torres Vergara, Alejandro Melo Molina.*	128-137

SUELOS ECUATORIALES

Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo

https://doi.org/10.47864/se552025p1116

Reseña Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo

Martha M. Bolaños Benavides[1*]✉, Leila A. Rojas Escobar[2]

[1*] Investigadora Ph.D. Senior Agrosavia; Presidente SCCS.
[2] Investigadora Ph.D. Asesora de Presidencia SCCS.

Vol. 55 (1 y 2) de 2025 | pp: 11-16 | ISSN 0562-5351 - E-ISSN 2665-6558

Para hacer una reseña histórica de la Sociedad Colombiana de La Ciencia del Suelo – SCCS, es necesario revisar la historia de la Sociedad Latinoamericana de La Ciencia del Suelo – SLCS. Según las fuentes consultadas (https://www.slcs.org.mx/index.php/informacion-general/historia), durante un congreso de la ALAF, en Bogotá en el año 1954, el Dr. Antonio Arena propuso a los edafólogos participantes, conformar la SLCS y sociedades nacionales de científicos de la ciencia del suelo.

En Colombia, el profesor Manuel del Llano aceptó esta propuesta y logró reunir alrededor de 20 edafólogos que decidieron conformar su propia sociedad, dándose la fundación de la **Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo** (SCCS), con lo cual se contribuye, además, a la creación de la SLCS.

ANTECEDENTES

El 3 de septiembre de 1955 bajo el liderazgo del profesor Manuel Del Llano se fundó la Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo en la ciudad de Medellín, secundado por profesores y estudiantes de la Facultad de Agronomía de la Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín.

La mayor actividad de la recién creada Sociedad fue la publicación de tres números de la Revista “Suelos Ecuatoriales” fundada y dirigida por el mismo profesor Del Llano, la cual se publica de forma ininterrumpida desde 1956.

En 1965 en una reunión de socios en Manizales se acordó trasladar la sede de la SCCS a Bogotá. Se nombró presidente Honorario al Dr. Del Llano y como presidente al Dr. Alfonso García Espinel, director del Departamento Agrológico del Instituto Geográfico Agustín Codazzi.

En 1968, siendo presidente de la SCCS el Dr. Servio Tulio Benavides, y, con la participación del Dr. Francisco Silva, se redactaron los estatutos con los que se obtuvo la personería jurídica No. 1878 en junio de 1968 ante el Ministerio de Gobierno (Horn et al. 2024). En 1970 se inició la actividad académica de la sociedad con el primer coloquio de suelos sobre acidez y encalamiento, llevado a cabo en Medellín, cuyas conferencias fueron publicadas en la reiniciación de la revista Suelos Ecuatoriales, dirigida por el Dr. Francisco Silva Mojica. Parte esencial de esos Estatutos fue, y es, el “*promover en todos sus aspectos el desarrollo de la Ciencia del Suelo y sus aplicaciones mediante reuniones científicas nacionales e internacionales*”.

Se dio así inicio a la realización de reuniones anuales en diversas ciudades colombianas, que con el tiempo dieron paso a la realización desde 1981, del "Congreso Colombiano de Ciencia del Suelo", el cual se convoca cada dos años.

La Sociedad funcionó inicialmente en el Instituto Geográfico Agustín Codazzi y en 1980 se adquirió una sede permanente en la Carrera 11 No. 66-34 Of. 204. Posteriormente, se trasladó la oficina de la SCCS a la Of. 202 con un salón anexo para reuniones de Junta Directiva, la cual es propiedad de la Sociedad.

ACTIVIDADES ACADÉMICAS

En cumplimiento de los estatutos donde se contempla "promover en todos sus aspectos el desarrollo de la Ciencia del Suelo y sus aplicaciones mediante reuniones científicas nacionales e internacionales", se iniciaron una serie de coloquios centrados en temas relevantes sobre la ciencia del suelo, con periodicidad anual, desarrollados en diferentes ciudades del país.

En 1981 se inicia la organización de los congresos nacionales "Congreso Colombiano de las Ciencias del Suelo" teniendo como sede Villavicencio. Desde este año, cada dos años se realiza el mencionado Congreso en diferentes capitales del país. Incluso en época pospandemia se celebró el XX Congreso en la ciudad de Neiva, Colombia del 19 al 21 de octubre del año 2022.

En el desarrollo de sus funciones, la Sociedad creó Comités Regionales en las principales capitales del país, con el fin de fortalecer sus investigaciones a nivel regional y lograr mayor difusión y divulgación de los resultados de estudios científicos y prácticos, para lo cual las regionales preparan los seminarios regionales.

Entre las actividades que merecen ser destacadas, desde 1997 la SCCS crea y coordina la red del Control Analítico de Laboratorios de Suelos – CALS, con el objetivo de optimizar la calidad analítica de los laboratorios en Colombia, tanto en los análisis de suelos como de tejidos vegetales, en la actualidad hay 23 laboratorios inscritos. La red CALS desempeña un papel fundamental como difusor del trabajo de la red LATSOLAN (Latin American Soil Laboratory Network) respondiendo de forma global a los objetivos de armonización y estandarización propuestos en el plan de acción para el Pilar 5 de la Alianza Mundial por el Suelo (AMS).

En 1982 con la participación del Dr. Ricardo Guerrero y el auspicio de la empresa Monómeros, se creó el Premio Nacional de la Ciencia del Suelo "Francisco Silva Mojica" para otorgar a la mejor tesis de pregrado y posgrado de estudiantes graduados en las diferentes universidades del país. El premio consistía inicialmente en un reconocimiento monetario y a partir del año 2008 en una Beca para conseguir el grado de maestría o doctorado en ciencias del suelo, en universidades nacionales o del exterior.

También se creó una Mención de Honor en Ciencia del Suelo para premiar la labor científica de profesionales destacados en las ciencias del suelo. Igualmente se ha otorgado la categoría de Socios Honorarios a 12 científicos nacionales y extranjeros.

En el año 2016 la SCCS postuló ante La Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), la obra Suelos y Tierras de Colombia, como la obra que más contribuyó con la información requerida para el manejo sostenible del recurso suelos en Colombia, ganadora del premio Mundial de Suelos "Glinka" otorgado por la FAO.

Suelos Ecuatoriales 55 (1 y 2): 11-16. https://doi.org/10.47864/se552025p1116

La SCCS publica la revista SUELOS ECUATORIALES desde 1956. El Volumen 52, se publicó en 2022. La revista esta indexada en cinco bases de datos, cuenta con Identificador de objeto digital DOI y desde el año 2019 se puede consultar todos sus números de manera digital. Además, la SCCS publica el Boletín de Suelos, donde se recoge de manera sucinta los simposios y actividades realizadas por los comités regionales y de la SCCS en general la participación de sus miembros a nivel nacional e internacional. Igualmente, la Sociedad ha publicado varios libros entre los que se destacan “Fertilidad de suelos: Diagnóstico y control", "Fundamentos para la interpretación de Análisis de suelos, plantas y aguas para riego”; “Ciencia del Suelo Principios Básicos” con especial referencia a suelos colombianos. Bajo un enfoque integrador, se han publicado libros sobre biofertilización como una alternativa viable para mejorar la nutrición vegetal, los cuales han tenido gran acogida en las universidades y entre los edafólogos para el estudio de la ciencia del suelo.

El 1 de diciembre de 2017 la SCCS fue invitada por la Oficina de Asuntos Internacionales del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible para participar en los pilares de acción de la Alianza Mundial por el Suelo, AMS, en la regional de Sudamérica y el Caribe, como líder del Pilar 3, el cual se encarga de la ”Promoción del desarrollo e investigación aplicada con enfoque en las brechas y prioridades identificadas y en sinergia con acciones productivas, ambientales y de desarrollo social relacionadas”. A partir de la mencionada fecha hasta la actualidad, la Sociedad ha coordinado acciones con otras entidades del país y participado en los diferentes simposios que a nivel mundial ha organizado la AMS en coordinación con la FAO.

Durante la época de la pandemia, año 2020, la Sociedad fue pionera en hacerse visible mediante la organización de un evento virtual que permitió la difusión académica de tres seminarios taller compuestos de 18 conferencias enfocadas en temáticas sobre Biología, Física y Química de Suelos, dictadas con gran éxito en los meses de junio y julio por investigadores de reconocida experiencia científica, la mayoría Socios de nuestra entidad.

En el año 2021, la SCCS postuló por Colombia a la Dra. Martha Marina Bolaños Benavides para la Commission 4.4 – Soil Education and Public awareness, en el marco de la convocatoria para postulaciones de Oficiales de División y Comisiones de la International Union Soil Sciences - IUSS 2022-2026. La Dra. Bolaños fue elegida presidente de la mencionada Comisión, y, por tanto, funcionaria de la IUSS.

En el ámbito de las políticas públicas, gracias a gestión del Dr. Luis Armando Castilla Lozano, Expresidente de la SCCS y de otros edafólogos se presentó el proyecto de ley sobre “Política para la gestión sostenible del suelo” (PGSS). El proyecto pasó exitosamente el primer debate en la legislación anterior del Congreso, no obstante, en esta nueva legislatura, se ve la necesidad de abrir los espacios con los nuevos ponentes o continuar la gestión para conocer a quien le sea asignado el proyecto, y avanzar en la construcción de la ley que permita al país contar con legislación propia sobre este recurso natural o bien público.

PARTICIPACIÓN DE LA SCCS EN INSTANCIAS INTERNACIONALES

A lo largo de los años, la SCCS ha mostrado crecimiento nacional y esto le ha permitido participar, aportar y lograr relevancia y trascendencia en los eventos e instancias Latinoamericanas e internacionales. El impacto de la SCCS en la SLCS se ha evidenciado mediante la participación y la calidad de presentaciones de sus miembros. En los últimos años, la actual presidente de la SCCS fue invitada como conferencista magistral en los Congresos Latinoamericanos de la Ciencia del Suelo realizados en Brasil y Bolivia.

En el ámbito global, la SCCS se ha destacado en la IUSS donde ha Presidido la Comisión 4.4 “Soil Education and Public Awareness” 2024-2026, así como en la Vicepresidencia de la Commission 2.5 “Soil Chemical, Physical and Biological Interfacial Reactions” para el periodo 2026-2028.

Por su parte, en la Alianza Mundial por el Suelo de la FAO, la SCCS se posicionó al nivel del ITPS con la participación de la Dra. Martha Marina Bolaños Benavides. El **ITPS** (por sus siglas en inglés, *Intergovernmental Technical Panel on Soils* o **Panel Técnico Intergubernamental sobre los Suelos**) es el órgano científico y técnico de la Alianza Mundial por el Suelo de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (**FAO).**

El ITPS está integrado por 27 expertos en suelos de renombre mundial, seleccionados en representación de todas las regiones del planeta bajo criterios de excelencia científica**.** Tiene como propósito: Proveer asesoramiento técnico y científico autorizado sobre cuestiones globales de los suelos, la gobernanza y el manejo sostenible (https://www.fao.org/global-soil-partnership/es).

Celebración y Compromisos Futuros

¡Es motivo de orgullo y satisfacción celebrar los 70 años de la SCCS!

Esta sociedad de científicos edafólogos cumplió sus 70 años en septiembre de 2025, razón por la cual, hacemos partícipes de esta celebración a todos los colegas socios, a estudiosos de las ciencias del suelo y a la ciudadanía en general. Es así como en el marco del XXII Congreso Colombiano de La Ciencia del Suelo, se resalta esta celebración y el trabajo constante y comprometido de muchos profesionales de la edafología que han contribuido a generar conocimiento sobre los suelos de Colombia, su taxonomía, sus propiedades mineralógicas, biológicas, físicas, químicas y bioquímicas. Conocimiento que ha contribuido a proponer y validar prácticas de manejo sostenible de los suelos en diferentes sistemas productivos y en las cinco regiones naturales de Colombia.

Lograr mantener activa a la SCCS por más de 70 años, es un gran logro y a la vez un gran compromiso para asegurar su continuidad, su fortalecimiento e impacto de sus acciones en diferentes ámbitos: académico, científico y político.

En el **ámbito académico** la SCCS debe propender por aportar sus conocimientos y gestión para que, en las universidades, tanto en programas de pregrado y con mayor razón en los programas de posgrado en las ciencias del suelo, se mantengan o enfatice en asignaturas como la taxonomía y clasificación de suelos, manejo y conservación, biología y bioquímica de suelos, entre otras.

Es fundamental que el conocimiento del suelo se imparta e inicie en etapas tempranas de la educación, en las escuelas y colegios, con el fin de despertar el interés de las niñas, niños y adolescentes. Según Reyes-Sánchez, 2016ª, la SCCS se constituye en parte esencial de la *Red Latinoamericana de Educación y Enseñanza de la Ciencia del Suelo* (RELAEECS), cuyo principal objetivo es impulsar, mediante el proyecto educativo “Así son los suelos de mi Nación®”, programas y actividades de educación y concientización para los niños y jóvenes de nuestros países sobre el valor del recurso suelo, sus funciones, su uso y necesidad de preservación de los suelos de Latinoamérica.

Suelos Ecuatoriales 55 (1 y 2): 11-16. https://doi.org/10.47864/se552025p1116

En la agenda académica del XXII Congreso Colombiano de La Ciencia del Suelo, por primera vez se ha organizado el **Simposio Estudiantil "El suelo: la piel de la Tierra"** con el objetivo de motivar a la niñez y juventud para estudiar el suelo. Esta iniciativa se enmarca en el propósito planteado por Reyes-Sánchez, 2016b, relacionado con concientizar a los profesionales, docentes y científicos, sobre la necesidad de educar a los ciudadanos desde su infancia, en una cultura de preservación de los recursos naturales en general, y de los edáficos, en particular; a la vez que se busca incluirlos en este esfuerzo.

En el ámbito científico, la SCCS se ha destacado por participar y aportar significativamente en la constitución de la SLCS, ejerciendo la primera Secretaría General de la SLCS a cargo del Dr. Francisco Silva Mojica. Así mismo, en la IUSS, el Dr. Álvaro García Ocampo fue el primer latinoamericano en presidir la Comisión 3.3 Fertilidad del suelo y nutrición vegetal, y recientemente la Dra. Martha Marina Bolaños se desempeña como presidente de la Comisión 4.4 Educación sobre el suelo y sensibilización pública (2026) y como miembro del ITPS de la Alianza Mundial por el Suelo de FAO. Por su parte la Dra. Melissa Lis-Gutiérrez será vicepresidente de la Comisión 2.5, Reacciones químicas, físicas y biológicas en la interfaz del suelo a partir de enero de 2027.

Lo anterior, debe motivar a otros socios y edafólogos para aportar y buscar hacer parte de estos y otros organismos o instancias internacionales, en los cuales se desarrollen acciones a favor del conocimiento del recurso suelo y de su manejo sostenible y eficiente. La gestión que se realice desde la SCCS en el ámbito científico internacional también permite la posible movilización de recursos técnicos y financieros para fortalecer las actividades propias de la SCCS y con esto mejorar su impacto en la sociedad colombiana.

En el ámbito político, la SCCS debe retomar la gestión para continuar el trámite del proyecto de ley sobre Gestión Sostenible del Suelo ante el legislativo. Se debe propender por continuar la articulación con el Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural – MADR, así como con el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible – MADS; con entidades como IGAC, IDEAM, Agrosavia, Universidades y otras instituciones encargadas o relacionadas con el estudio de los suelos, su manejo sostenible y encargadas de la formulación de políticas públicas.

Recientemente, se han emitido políticas públicas como la resolución 331 de 2024 sobre agroecología y otras relacionadas con la producción de bioinsumos, y en la implementación de estas y otras políticas se requiere el aporte de los científicos de las ciencias del suelo. Así que este es un ámbito que ofrece una oportunidad para que la SCCS muestre su protagonismo en las diferentes regiones del país y en muchos sistemas productivos agropecuarios.

CONCLUSIONES

Para mantener activa de SCCS, es necesario el compromiso y decisión de todos los socios para apoyar a la junta directiva, en la materialización de los objetivos propuestos e incrementar el número de asociados; llevar a cabo eventos científicos regionales, nacionales e internacionales; participación en la formulación e implementación de políticas públicas relacionadas con el recurso suelo; fomentar y concretar acciones para llevar el conocimiento de la ciencia del suelo a las instituciones educativas desde la infancia en las escuelas, la juventud y fortalecer las asignaturas relacionadas con la edafología en los programas de pre y posgrado.

En los escenarios de cambios que hoy predominan en el mundo, es tarea de todos propender por la sostenibilidad, es imperativo educar y sensibilizar a la población: niñas, niños, jóvenes,

productores agropecuarios, sobre la importancia del recurso suelo, considerado como **un bien** y reconocer su valor para garantizar la seguridad alimentaria y los servicios ecosistémicos que permiten que continúe la vida.

REFERENCIAS

Horn, R., Blum, W. & Reyes-Sánchez L. B. (eds.) 2024. IUSS 1924-2024: A Centennial Documentation of its National Members. International Union of Soil Sciences (IUSS). ISBN: 979-12-81552-03-6. https://www.iuss.org/soil-publications/iuss-publications/iuss-1924-2024/

Reyes Sánchez, L. B. 2016a. "La Red Latinoamericana de Educación y Enseñanza de la Ciencia del Suelo", en el Libro Blanco: "Tratamiento de la entrada «suelo» en los libros de texto de enseñanza no universitaria en España". © Sociedad Española de la Ciencia del Suelo. www.secs.com.es/archivo/libro-suelo.pdf http://www.secs.com.es/wp-content/uploads/2017/06/Llibro-de-los-suelos-digital-2-Edición.pdf

Reyes, Sánchez L. B. 2016b. "Estudiantes de educación básica, media y superior en los Congresos de la Sociedad Latinoamericana de la Ciencia del Suelo", en el Libro Blanco: "Tratamiento de la entrada «suelo» en los libros de texto de enseñanza no universitaria en España". © Sociedad Española de la Ciencia del Suelo. www.secs.com.es/archivo/libro-suelo.pdf

https://www.fao.org/global-soil-partnership/es

https://www.slcs.org.mx/index.php/informacion-general/historia. Consultado en agosto de 2026.

JUNTA DIRECTIVA NACIONAL 2025 – 2026

Presidente:
Martha Marina Bolaños Benavides

Principales
Martha M. Bolaños Benavides
Guillermo López Pérez
Melissa Liz
Armando Torrente Trujillo
Ibonne Geaneth Valenzuela Balcázar

Suplentes
Juan Guillermo Cubillos Hinojosa
Francisco Restrepo Higuita
Hugo Ruiz Erazo
Rosalina González
Martha Daza

https://www.sccsuelos.org/

Suelos Ecuatoriales 55 (1 y 2): 11-16. https://doi.org/10.47864/se552025p1116

SUELOS ECUATORIALES

Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo

https://doi.org/10.47864/se552025p1723

Quiénes somos y de dónde venimos: Honor a quien Honor merece

Who we are and where we come from: Honor to whom Honor is due

Laura Bertha Reyes-Sánchez[1*]✉

[1*] Departamentos de Química e Ingeniería Agrícola. Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán. Universidad Nacional Autónoma de México.

Vol. 55 (1 y 2) de 2025 | pp: 17-23 | ISSN 0562-5351 E-ISSN 2665-6558 | REC.: 28/07/2026 - ACEP.: 10/08/2026

RESUMEN

En este 70 aniversario de la fundación de la Sociedad Colombiana si bien es tiempo de celebrar logros, también lo es de retomar objetivos a reforzar, de analizar de forma crítica qué debemos cambiar, y de construir de forma decidida esos espacios aún por conquistar para el fortalecimiento decidido de la SCCS.

Palabras Clave: Construcción, Fortalecimiento, Ciencia del Suelo, Educación, concientización.

ABSTRACT

On this 70th anniversary of the founding of the Colombian Society, while it is a time to celebrate achievements, it is also a time to revisit objectives to reinforce, to critically analyze what we must change, and to decisively build those spaces still to be conquered for the decisive strengthening of the SCCS.

Key words: Building, Strengthening, Soil Science, Education, awareness.

DE DÓNDE VENIMOS

Antes del año 1954, la mayoría de los edafólogos existentes en Latinoamérica conformaban en conjunto con los fitopatólogos y entomólogos, una Sociedad Científica denominada *ALAF*, y editaban una revista llamada Turrialba que contaba con el auspicio del Instituto Interamericano para el Desarrollo Agrícola (IICA). Sin embargo, en el año 1954 con motivo del congreso de la *ALAF* en Bogotá, el Dr. Antonio Arena invitó a los edafólogos asistentes a participar en la organización de una Sociedad Latinoamericana de la Ciencia del Suelo (SLCS) que estuviera conformada por sociedades nacionales de edafólogos en cada uno de nuestros países Latinoamericanos; acordándose en esa misma ocasión y bajo esa misma iniciativa, que el primer congreso de esa sociedad en formación se realizara en la Argentina (https://www.slcs.org.mx/index.php/informacion-general/historia, & Horn et al. 2024).

Fue así que en respuesta a la invitación del Dr. Arena, el profesor Manuel del Llano logró reunir alrededor de 20 edafólogos Colombianos que decidieron conformar su propia sociedad y contribuir con una cuota provisional de $1.00 USD por socio, a la fundación de la Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo (SCCS), contribuyendo a la vez a la creación de la naciente Sociedad Latinoamericana de la Ciencia del Suelo (SLCS).

Es así como el 3 de septiembre de 1955 en Medellín, el profesor Manuel del Llamo fundó la Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo con la colaboración de otros profesionales de la edafología, entre los que se encontraban: Emilio Ramírez, Javier Gómez, Francisco Galiano Sedan, Francisco Silva Parra, Jairo Correa, Jairo Gómez, Ramón Serna, Agathón Wieczorek, Bernardo Martínez, Ovidio Restrepo, Francisco Montoya, Jaime Lotero, Carlos J. Pinilla, Enrique Moncayo, Oscar Ospina, Alfonso Aristizábal, Guillermo Guerra y Guillermo Ortiz R. (https://www.slcs.org.mx/index.php/informacion-general/historia, & Horn et al. 2024).

Si bien desde la fundación de la SCCS se dio prioridad a la publicación de tres números por año de la Revista “Suelos Ecuatoriales”, la cual se publica de forma ininterrumpida desde 1956, no fue sino hasta 1968, cuando bajo la presidencia del Dr. Servio Tulio Benavides, y, con la colaboración del Dr. Francisco Silva, se redactaron los estatutos con los que se obtuvo la figura jurídica No. 1878 en junio de 1968 ante el Ministerio de Gobierno (Horn, et al. 2024).

Parte esencial de esos Estatutos fue, y es, el *"promover en todos sus aspectos el desarrollo de la Ciencia del Suelo y sus aplicaciones mediante reuniones científicas nacionales e internacionales".* Se dio así inicio a la realización de reuniones anuales en diversas ciudades colombianas, que con el tiempo dieron paso a la realización desde 1981, del "Congreso Colombiano de Ciencia del Suelo" cada dos años.

Siendo esta última una decisión trascendental que a lo largo de los años se ha visto reflejada no sólo en el crecimiento nacional de la SCCS, sino igualmente en su importancia y trascendencia en los marcos Latinoamericano e internacional, donde su impacto se ha visto reflejado tanto en la SLCS -a través de su constante participación y la calidad de presentaciones de sus miembros-, como en la IUSS donde han Presidido la Comisión 4.4 “Soil Education and Public Awareness” 2024-2026, así como en la Vicepresidencia de la Commission 2.5 “Soil Chemical, Physical and Biological Interfacial Reactions” para el periodo 2026-2028, y en la Alianza Mundial por el Suelo de la FAO donde la SCCS se posicionó al nivel del ITPS con la destacada participación de la Dra. Martha Marina Bolaños.

HACIA DÓNDE DIRIGIR ESFUERZOS Y SOBRE CUÁLES PRIORIDADES TRABAJAR PARA FORTALECERNOS

En este 70 aniversario de la fundación de la Sociedad Colombiana si bien es tiempo de celebrar logros, también lo es de retomar objetivos a reforzar, de analizar de forma crítica qué debemos cambiar, y de construir de forma decidida esos espacios aún por ocupar para el fortalecimiento decidido y constante de la SCCS.

a) ***Conciencia y conocimiento del valor del recurso suelo:***
Si bien entre los objetivos principales de la SCCS se encuentra el *“Propender por una conciencia*

Suelos Ecuatoriales 55 (1 y 2): 17-23. https://doi.org/10.47864/se552025p1723

y entendimiento de la importancia de los recursos naturales y particularmente, lo que los suelos representan para la Sociedad Colombiana", y siendo trascendental para la sostenibilidad edáfica el educar y concientizar a los futuros ciudadanos para impulsar esa conciencia y cabal entendimiento de lo que el recurso suelo significa para la vida en La Tierra, no es sino hasta la presentación del proyecto educativo "Así son los Suelos de mi Nación®" durante el XVI Congreso Latinoamericano de la Ciencia del Suelo realizado en Cartagena de Indias en 2004, que se propone y acepta la incorporación de este proyecto a la SCCS y la creación de la Red Latinoamericana de Educación y Enseñanza de la Ciencia del Suelo (RELAEECS) (Reyes-Sánchez, 2016a; Plá, 2016), todo lo cual quedó asentado y firmado por todos los Presidentes de las Sociedades Nacionales en la "**Declaración de Cartagena de Indias**" aprobada por unanimidad de la Asamblea General Latinoamericana que así lo confirmó (https://www.slcs.org.mx/index.php/informacion-general/declaraciones/6-declaracion-de-cartagena-de-indias).

Es así como la SCCS se constituye en parte esencial de la Red Latinoamericana de Educación y Enseñanza de la Ciencia del Suelo (RELAEECS), cuyo principal objetivo es impulsar, a través del poryecto educativo "Así son los suelos de mi Nación®", programas y actividades de educación y concietización para los niños y jóvenes de nuestros países sobre el valor del recurso suelo, sus funciones, su uso y necesidad de preservación de los suelos de la región latinoamericana (Reyes-Sánchez, 2016a).

Así son los suelos de mi nación:

"Así son los suelos de mi Nación®"[1] es un proyecto de educación, investigación educativa y divulgación científica del preescolar al bachillerato, que se desarrolla desde la UNAM en colaboración con todos los países miembros de la Sociedad Latinoamericana de la Ciencia del Suelo, al cual se suma desde 2004 la SCCS a través de la "Declaración de Cartagena de Indias". Como parte de este proyecto educativo se efectúa desde el año 2000, el *"Simposio de Innovaciones Educativas en la Enseñanza de la Ciencia del Suelo"* al interior de los Congresos Mexicanos de Ciencia del Suelo, y a partir de 2004 a niveles Nacionales y Latinoamericano de la Ciencia del Suelo como un espacio propio y propicio para los niños y jóvenes pero, a la vez, inmerso en una actividad propia de docentes e investigadores, quienes se quiere que convivan e interrelacionen con ellos con el objetivo de a la par, concientizar a los profesionales, docentes y científicos, sobre la necesidad de educar a los ciudadanos desde su infancia, en una cultura de preservación de los recursos naturales en general, y de los edáficos, en particular; a la par que incluirlos en este esfuerzo (Reyes-Sánchez, 2016b).

Si bien niños y jóvenes han participado en este esfuerzo representando a la SCCS a nivel Latinoamericano, hasta ahora, esto ha sido fundamentalmente gracias al esfuerzo educativo y económico de escuelas privadas Colombianas que han respondido a las convocatorias para participar en los Simposios Latinoamericanos de la Ciencia del Suelo. Sin embargo, la formación de una Secretaría de Educación de la SCCS que organice estas actividades es tarea pendiente y urgente a realizar, no sólo a efecto de dar cumplimiento a su objetivo declarado de *"Propender por una conciencia y entendimiento de la importancia de los recursos naturales y particularmente, lo que los suelos representan para la Sociedad Colombiana"*, sino más importante aún, para hacer realidad el *formar los futuros edafólogos para su nación*.

[1]. Así son los Suelos de mi Nación® 03-2008-031411423000-01

b) Apoyo a los jóvenes científicos:

Sin duda alguna, el educar a las nuevas generaciones de niños y jóvenes es una prioridad (IUSS 2022a), pero el apoyar el desarrollo de jóvenes científicos es igualmente una elevada prioridad para la SLCS y para la Union Internacional de la Ciencia del Suelo (IUSS), pues los jóvenes científicos son el relevo generacional de toda Sociedad de la Ciencia del Suelo para cumplir con su misión. (Reyes-Sánchez, 2019 & 2024).

Por ello, desde la IUSS y en respuesta a esta elevada prioridad se estableció en el año 2022 el "Grupo de Trabajo de Jóvenes Científicos y Científicos de Carrera Inicial" (*Young and Early Career Scientists Working Group: YECS*) como parte de la estructura de la División 4 de la IUSS (IUSS, 2022b).

Actualmente participan en el YECS 436 jóvenes de 62 nacionalidades, cuyas actividades son organizadas y pueden ser seguidas en línea a través de las direcciones @yecs.iuss en Instagram, YECS IUSS en LinkendIn y @yecs_iuss en X. Los jóvenes pueden inscribirse voluntariamente al YECS a través del siguiente formato en línea: https://forms.gle/kQRNAitqdijbAP8V9. Sin embargo, sólo 14 miembros del YECS son de nacionalidad Colombiana.

Siendo el objetivo principal del "Grupo de Trabajo de Jóvenes Científicos y Científicos de Carrera Inicial" el alentar a los científicos del suelo a practicar el pensamiento interdisciplinario y transdisciplinario en todas sus actividades y orientar sus esfuerzos de investigación, educación, concientización y divulgación hacia la preservación del recurso del suelo a través de su gestión sostenible (Reyes-Sánchez, 2024); la invitación es a tomar conciencia de que los jóvenes científicos son nuestro futuro, por lo que todo trabajo y esfuerzo debe ser dirigido a su formación e incorporación que fortalezca a cada una de nuestras Sociedades Nacionales haciendo realidad el ideal Latinoamericano de "PRESERVAR EL RECURSO SUELO COMO UN BIEN COMÚN DE LA HUMANIDAD" (SLCS: Declaración de Mar del Plata, 2012).

c) La formación de docentes que apoyen la formación de la conciencia y conocimiento necesarios.

Avanzar hacia el desarrollo no es posible sin una enseñanza y aprendizaje de la ciencia que nos permita formar en los niños y jóvenes tanto el conocimiento como los valores necesarios para ello (Reyes-Sánchez, 2012b).

Por ello tanto la ONU, 1992 y 2012, como la UNESCO, 1987, destacan la importancia de **capacitar a docentes cuyas actividades y decisiones influyen significativamente en la educación de los futuros ciudadanos:** *preparándolos para afrontar el reto de responder a los problemas ambientales presentes y futuros*.

Sin embargo, y en contraste con lo anterior, cuando la mayoría de los docentes que imparten la ciencia del suelo tanto a nivel profesional como de posgrado, transmiten información básica y especializada de diversos niveles, y los estudiantes aprenden a utilizar ese conocimiento de forma teórica y práctica; la información obtenida también se analiza, descifra y utiliza para realizar cálculos, interpretaciones, correcciones y proyecciones, pero esto no significa que esos docente

hayan logrado que las personas hayan desarrollado una conciencia ambiental, ni que hayan construido una cultura de preservación (Reyes-Sánchez, 2018).

Por ello, si lo que se busca es difundir un conocimiento que implique la construcción de una conciencia ciudadana que se refleje en una cultura de preservación del recurso edáfico, es entonces necesario formar a los futuros científicos y docentes no solo para que generen conocimiento sobre el recurso del suelo, sino también para que eduquen a sus estudiantes para que lo preserven como un elemento indispensable para la vida.

Para Einstein, "*La mayoría de las ideas fundamentales de la ciencia son esencialmente simples y, por lo general, pueden expresarse en un lenguaje comprensible para todos"*

Luego entonces, lo realmente importante es capacitar a científicos y docentes para que sean capaces de explicar con claridad y en palabras sencillas a cada ciudadano, y en todos los niveles educativos, *por qué el suelo es esencial para la existencia de la vida y cómo su pérdida nos afecta a todos*, independientemente de la clase social a la que pertenezcamos.

d) Fortalecimiento de la participación de la SCCS en la SLCS y la IUSS.

Desde su fundación, la Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo ha sido protagonista participando tanto en la redacción de los primeros estatutos de la Sociedad Latinoamericana de la Ciencia del Suelo (SLCS) como hospedando la primera Secretaría General de la SLCS a cargo de Don Francisco Silva Mojica, en tanto que a nivel de la IUSS el Dr. Álvaro García del Ocampo fue el primer latinoamericano en presidir la Comisión 3.3 Fertilidad del suelo y nutrición vegetal, y en tiempos recientes la Dra. Martha Marina Bolaños se desempeñó como la Presidente de la Comisión 4.4 Educación sobre el suelo y sensibilización pública y como miembro del ITPS de la Alianza Mundial por el Suelo de FAO, en tanto que la Dra. Melissa Lis-Gutiérrez será Vicepresidente de la Comisión 2.5 Reacciones químicas, físicas y biológicas en la interfaz del suelo a partir de enero de 2027. No obstante, las posibilidades de participación de los miembros de la SCCS en los ámbitos internacionales son mucho mayores y en ello se debiera poner énfasis en los años por venir.

CONCLUSIONES

El fortalecimiento decidido de la SCCS implica, tanto en el futuro inmediato como en el largo plazo, el comprometerse a actuar firmemente en diferentes líneas que, respondiendo a sus propios estatutos, comprometa, tanto a su directiva como a sus miembros a trabajar decididamente en todos los niveles que confluyen en el logro de la sostenibilidad del recurso natural que es objeto de su existencia.

Comprender que a efecto de crear una cultura de sostenibilidad es fundamental que los contenidos curriculares se enseñen con una conciencia de preservación y para el bienestar de todos, es trascendental cuando hablamos de la formación de científicos y docentes; no solo porque quienes los forman deben asumirlo y ponerlo en práctica, sino también porque deben ser capaces de transmitirlo tanto a nivel básico y profesional como de posgrado, de forma interdisciplinaria.

Al respecto, en la Revista "Suelos Ecuatoriales" Plá en 2016, hizo un llamado a "Ampliar la actual Red Latinoamericana de Educación y Enseñanza de la Ciencia del Suelo (RELAEECS),

tranformándola en una Comisión Permanente de Educación en Ciencia del Suelo de la SLCS, con dos Sub-Comisiones, una de ellas dedicada a la Enseñanza a nivel de niños y adolescentes (como la actual RELAEECS), y otra dedicada a la Enseñanza a nivel superior: pre y postgrado" (Plá, 2016).

Repecto a lo expresado por Plá, 2016; el llevar a cabo un proyecto que como "Así son los Suelos de mi Nación®" organice a través de la RELAEECS para el pre y posgrado en ciencias del suelo: objetivos, programas, materiales, actividades, recursos didácticos, eventos formativos, etc., es tanto perfectamente posible como deseable y tarea pendiente -más no imposible- de realizar para las Universidades, escuelas y Sociedades Nacionales de la Ciencia del Suelo.

Comprometerse con la preservación de la vida en el planeta significa comprometerse con la sostenibilidad del recurso suelo y requiere de una firme voluntad, para a través de la docencia, el ejercicio práctico y la investigación, ser capaces, tanto de contribuir a la construcción de una práctica profesional como de ofrecer una educación que promueva la búsqueda de *alternativas éticamente aceptables, económicamente viables, energéticamente deseables y ambientalmente respetuosas con el equilibrio de los ecosistemas, y que construya el camino de una ciencia socialmente responsable* (Reyes-Sánchez, 2012a).

Porque educar para la sostenibilidad es la prioridad, y conscientes todos de nuestra responsabilidad social al respecto, es crucial involucrar hoy mismo a edafólogos, sociedades científicas, instituciones de investigación y universidades de todo el mundo en los esfuerzos por educar y sensibilizar a todo ciudadano y en todo nivel sobre el valor del suelo mediante su participación directa en la formación, educación y concientización de las futuras generaciones del mundo que son quienes deberán preservar el recurso suelo y por ende la vida en el planeta.

REFERENCIAS

Declaración de Mar del Plata. 2012. Sociedad Latinoamericana de la Ciencia del Suelo: http://slcs.org.mx/index.php/es/informacion-general/declaraciones/8-mar-del-plata

Declaración de Cartagena de Indias. 2004. https://www.slcs.org.mx/index.php/informacion-general/declaraciones/6-declaracion-de-cartagena-de-indias

Horn, R., Blum, W. & Reyes-Sánchez L. B. (eds.) 2024. IUSS 1924-2024: A Centennial Documentation of its National Members. International Union of Soil Sciences (IUSS). ISBN: 979-12-81552-03-6. https://www.iuss.org/soil-publications/iuss-publications/iuss-1924-2024/

IUSS 2022a. IUSS International Union of Soil Sciences Strategic Plan 2021-2030. Available at: https://www.iuss.org/about-the-iuss/iuss-strategic-plan-2021-2030/

IUSS 2022b. Young and Early Career Scientists Working Group of the International Union of Soil Sciences. Available at: https://www.iuss.org/organisation-people/organisation/working-groups/

Plá Sentis. 2016. Suelos Ecuatoriales 46(1 y 2):120-128

Reyes Sánchez L. B. 2012a. Aporte de la Química Verde a la construcción de una ciencia socialmente responsable. Educación Química. 23, 2, 222-229. ISSN 0187-893-X https://doi.org/10.1016/S0187-893X(17)30113-1 https://www.elsevier.es/es-revista-educacion-quimica-78-articulo-aporte-quimica-verde-construccion-una-S0187893X17301131

Reyes-Sánchez L. B. 2012b. Enseñanza de la ciencia del suelo: estrategia y garantía de futuro. Spanish Journal of Soil Science. 2, 1, 87-99. https://10.3232/SJSS.2012.V2.N1.07 http://ojsuniversia.xercode.com/index.php/sjss/article/view/150/ensenanza-ciencia-suelo-estrategia-garantia-futuro-ISSN-e : 2253-6574.

Reyes Sánchez L. B. 2016a. "La Red Latinoamericana de Educación y Enseñanza de la Ciencia del Suelo", en el Libro Blanco: "Tratamiento de la entrada «suelo» en los libros de texto de enseñanza no universitaria en España". © Sociedad Española de la Ciencia del Suelo. www.secs.com.es/archivo/libro-suelo.pdf http://www.secs.com.es/wp-content/uploads/2017/06/Llibro-de-los-suelos-digital-2-Edición.pdf

Reyes Sánchez L. B. 2016b. "Estudiantes de educación básica, media y superior en los Congresos de la Sociedad Latinoamericana de la Ciencia del Suelo", en el Libro Blanco: "Tratamiento de la entrada «suelo» en los libros de texto de enseñanza no universitaria en España". © Sociedad Española de la Ciencia del Suelo. www.secs.com.es/archivo/libro-suelo.pdf

Reyes-Sánchez, L. B. 2018. "Edaphological Approaches to Advancing Sustainable Development Goals: An Educational Perspective to Build a Citizen Preservation Culture". In Soil and Sustainable Development Goals of the U.N. R. Lal, R. Horn, and T. Kosaki Eds. (Stuttgart, Germany: Schweizerbart Science Publishers).

Reyes-Sánchez, L. B. 2019. "THE IUSS GOES TO THE SCHOOL"®. in the IUSS General Educative Project. IUSS Document. Available at: https://www.iuss.org

Reyes-Sánchez L. B. 2024. An educational gaze from the International Union of Soil Sciences. Span. J. Soil Sci. 13:12208. https://doi.org/10.3389/sjss.2023.12208

SLCS: https://www.slcs.org.mx/index.php/informacion-general/historia

UN 1992. Rio Declaration on Environment and Development. Available at: http://www.un.org

UN 2012. Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo Sostenible, Río de Janeiro, Brasil. Available at: https://www.un.org/es/conferences/environment/rio2012.

UNESCO 1987. La Educación ambiental: las grandes orientaciones de la Conferencia de Tbilisi. Available at: https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000038550_spa

SUELOS ECUATORIALES

Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo

https://doi.org/10.47864/se552025p2435

Transferencia de Conocimiento Agrícola Mediante Sistemas de Inteligencia Artificial Agéntica: Una Revisión

Agricultural Knowledge Transfer Through Agentic Artificial Intelligence Systems: A Review

Edgar Leonardo Camero Ortiz[1*] ✉

[1*] Universidad Surcolombiana, Avenida Pastrana Borrero con Carrera 1, Neiva, Colombia.

Vol. 55 (1 y 2) de 2025 | pp: 24-35 | ISSN 0562-5351 E-ISSN 2665-6558 | REC.: 30/07/2026 - ACEP.: 16/08/2026

RESUMEN

La transferencia efectiva de conocimiento hacia los pequeños agricultores es un desafío fundamental para la sostenibilidad agropecuaria y la mitigación del cambio climático. Actualmente, la brecha existente entre los avances científicos en edafología y las prácticas aplicadas en campo limita severamente la productividad y amenaza la preservación de la salud del suelo. Este artículo de revisión analiza de manera exhaustiva cómo los Sistemas Multi-Agente (MAS) o Inteligencia Artificial (IA) Agéntica han comenzado a abordar esta problemática, superando las limitaciones de los enfoques de extensión agrícola tradicionales. Para ello, se aplicó una metodología híbrida de revisión de literatura que combinó el rigor tradicional con herramientas computacionales avanzadas, incluyendo el cribado manual de 321 artículos y la validación humana de 190 documentos preprocesados mediante IA. Los hallazgos demuestran que los sistemas agénticos logran superar a los modelos predictivos convencionales gracias a su autonomía, capacidad de razonamiento iterativo, uso de herramientas externas (como RAG) y adaptación al contexto local. Frameworks recientes, tales como AgroAskAI y Farmer.Chat, ofrecen soluciones prácticas al "ruido semántico" la barrera cognitiva y lingüística entre el lenguaje técnico-científico y el dialecto del agricultor rural permitiendo recomendaciones precisas en tiempo real. Se concluye que la integración de IA agéntica en la agricultura democratiza el acceso a la agronomía de precisión, facilitando el manejo sostenible de diferentes tipos de suelos bajo el sistema U.S. Soil Taxonomy, aunque persisten retos significativos frente a la brecha digital y la gobernanza de datos.

Palabras clave: Sistemas Multi-Agente, Extensión Agrícola, Ruido Semántico, Modelos de Lenguaje Grande (LLM), Manejo sostenible del suelo.

ABSTRACT

The effective transfer of knowledge to smallholder farmers remains a fundamental challenge for agricultural sustainability and climate change mitigation. Currently, the gap between scientific advances in edaphology and field-applied practices severely limits productivity and threatens soil health preservation. This review article comprehensively analyzes how Multi-Agent Systems (MAS) or Agentic Artificial Intelligence (AI) have begun to address this issue, overcoming the limitations of traditional agricultural extension approaches. To this end, a hybrid literature review methodology was applied, combining traditional rigor with advanced computational tools, including the manual screening of 321 articles and the human validation of 190 documents pre-processed by AI. Findings demonstrate that agentic systems outperform conventional predictive models due to their autonomy, iterative reasoning capabilities, use of external tools (such as RAG), and adaptation to local contexts. Recent frameworks, such as AgroAskAI and Farmer.Chat, offer practical solutions to "semantic noise" the cognitive and linguistic barrier between technical-scientific language and rural farmer dialects enabling precise, real-time recommendations. It is concluded that the integration of agentic AI in agriculture democratizes access to precision agronomy, facilitating the sustainable management of different soil types under the U.S. Soil Taxonomy system, although significant challenges persist regarding the digital divide and data governance.

Keywords: Multi-Agent Systems, Agricultural Extension, Semantic Noise, Large Language Models (LLM), Soil Sustainability.

INTRODUCCIÓN

La agricultura contemporánea enfrenta dilemas importantes debido principalmente a la necesidad de garantizar la seguridad alimentaria mundial frente a un escenario de cambio climático acelerado, y la degradación de servicios ecosistémicos y escasez de recursos hídricos. Se proyecta que para el año 2050 la población superará los 9.500 millones de personas, lo que incrementa la presión sobre el recurso edáfico de manera exponencial. En este panorama, la gestión del suelo ha dejado de ser un reto meramente técnico para transformarse en un asunto de interés público, donde el recurso es reconocido como un valor irremplazable para el avance de la sociedad y la preservación de la vida (Burbano Orjuela, 2022).

Históricamente, los servicios de extensión agrícola han actuado como el vehículo principal para transferir innovaciones desde los centros de investigación hacia el campo; sin embargo, estos modelos tradicionales adolecen de limitaciones críticas en términos de escalabilidad, inmediatez y adaptación al contexto hiperlocal (High et al., 2026). En ese sentido, la modelación espacial multi-agente ha demostrado ser una herramienta poderosa para comprender los procesos de difusión de innovaciones y de cambio en el uso de los recursos, al capturar explícitamente las interacciones sociales entre los productores (Berger, 2001). Una de las barreras más persistentes para la adopción de innovaciones sostenibles es el denominado "ruido semántico". Este fenómeno se manifiesta como una desconexión cognitiva y lingüística profunda entre el tecnicismo de los investigadores y los saberes tradicionales o lógicas empíricas de los agricultores (Prajapati et al., 2025). Mientras que el lenguaje científico se estructura bajo sistemas estandarizados como la U.S. Soil Taxonomy para clasificar órdenes complejos como el manejo de Andisols con rasgos redoximórficos o Vertisols con arcillas expansivas, el agricultor emplea un léxico regional y un conocimiento tácito fundamental que los sistemas de extensión convencionales rara vez logran decodificar (Burbano Orjuela, 2022). Al igual que en la lingüística computacional, donde la falta de datos masivos requiere agentes especializados para el análisis de léxicos específicos, la transferencia de conocimiento agrícola exige sistemas que puedan interpretar la jerga regional y armonizarla con la literatura científica verificada (Singleton et al., 2024).

Como respuesta a estos desafíos, la Inteligencia Artificial (IA) ha evolucionado desde sistemas expertos estáticos hacia los Sistemas Multi-Agente (MAS) o IA Agéntica. Esta evolución está documentada en revisiones sistemáticas que consolidan el avance de las tecnologías de IA en el sector agrícola, desde los sistemas expertos hasta los enfoques agénticos (Elbaşı et al., 2023). A diferencia de la IA generativa pasiva, un sistema agéntico posee la autonomía para razonar, planificar y colaborar entre múltiples "agentes" especializados suelo, clima, plagas y mercado que funcionan como una "mesa redonda virtual" capaz de resolver consultas agrícolas multifactoriales (Cantonjos & Biswas, 2026). Esta arquitectura permite que cada agente aborde una subtarea específica; por ejemplo, mientras un agente analiza la fertilidad del suelo en términos de NPK y pH, otro evalúa las predicciones meteorológicas, logrando un consenso que se traduce en recomendaciones prácticas y precisas para el productor (Amjad et al., 2025). Implementaciones recientes materializan esta arquitectura, como frameworks que integran agentes dedicados al monitoreo de nutrientes del suelo (NPK), al sensado climático y a la detección de enfermedades por visión artificial, coordinados por un agente supervisor en una plataforma única de análisis predictivo (Murad et al., 2026). Frameworks de vanguardia como AgroAskAI, OpenAg y

Farmer.Chat han comenzado a demostrar que es posible democratizar el acceso a la agronomía de precisión mediante el uso de arquitecturas multimodales y herramientas de Generación Aumentada por Recuperación (RAG). Estas tecnologías permiten mitigar las "alucinaciones" de los modelos de lenguaje al asegurar que cada recomendación esté anclada en documentos científicos y datos de sensores en tiempo real (Akbar et al., 2025). En esta misma dirección, los sistemas de asesoría basados en chatbots permiten a los pequeños agricultores acceder en cualquier momento a recomendaciones prácticas respaldadas por bases de conocimiento digitales, superando las limitaciones de cobertura de la extensión tradicional (Mzumara & Mulepa, 2025).

Evidencia reciente en el manejo de la salud del suelo sugiere que la implementación de agentes basados en Aprendizaje por Refuerzo Multiagente (MARL) puede lograr reducciones del 56.7% en el uso de fertilizantes nitrogenados sin sacrificar el rendimiento del cultivo, optimizando así la rentabilidad y minimizando el impacto ambiental (Amjad et al., 2025). No obstante, la integración de estas tecnologías en el sector rural no está exenta de riesgos. Existe una preocupación creciente sobre la brecha digital y el riesgo de un "monopolio del conocimiento" por parte de grandes corporaciones, lo que podría marginar aún más a los pequeños productores que carecen de infraestructura o alfabetización digital (Sarfo et al., 2025). En esa línea, la tipología de fincas la clasificación de explotaciones heterogéneas en grupos homogéneos según sus características biofísicas y socioeconómicas permite dirigir las intervenciones de extensión a las necesidades específicas de cada grupo, superando el enfoque de "talla única" (Sinha et al., 2022).

La efectividad de la transferencia de conocimiento depende fundamentalmente de la construcción de confianza, la transparencia algorítmica (IA Explicable o XAI) y el mantenimiento de un enfoque de "humano en el ciclo" (human-in-the-loop), donde el experto y el productor validen las decisiones de la máquina (Sinha, 2026, Havlik et al., 2025). La tecnología no debe verse como un fin, sino como un catalizador de un aprendizaje transformador que respete la identidad y creatividad del campesino (Burbano Orjuela, 2014, High et al., 2026).

El objetivo de este artículo de revisión es analizar de manera exhaustiva el estado del arte de la Inteligencia Artificial Agéntica aplicada a la transferencia de conocimiento hacia pequeños agricultores. Se examina cómo estos sistemas mitigan el ruido semántico mediante el procesamiento de lenguajes naturales, superan las deficiencias estructurales de la extensión tradicional y facilitan el manejo sostenible de diferentes tipos de suelos.

A través de este análisis, se busca fundamentar una nueva gobernanza del recurso edáfico basada en la integración de la ciencia de vanguardia con la realidad social y ecológica del campo, promoviendo una agricultura que sea ética, equitativa y resiliente ante la crisis climática global (Burbano Orjuela, 2022).

Rigor Metodológico de la Revisión Bibliográfica

Para garantizar la transparencia, exhaustividad y reproducibilidad de esta revisión, se adoptó una metodología híbrida basada en las directrices del modelo PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses), un estándar ampliamente reconocido para la síntesis de evidencia científica en dominios interdisciplinarios (Akbar et al., 2025, Gund et al., 2025). El proceso se estructuró en tres fases secuenciales que integraron el criterio experto humano con

Suelos Ecuatoriales 55 (1 y 2): 24-35. https://doi.org/10.47864/se552025p2435

herramientas de Inteligencia Artificial (IA) generativa.

Fase 1: Identificación y búsqueda de literatura. Se realizaron consultas exhaustivas en seis bases de datos académicas globales: OpenAlex, Crossref, CORE, BASE, ArXiv y Semantic Scholar. El diseño de las ecuaciones de búsqueda se orientó a capturar la intersección entre los sistemas agénticos, la transferencia de conocimiento rural y la gestión de recursos naturales, utilizando los siguientes operadores booleanos:

> *("knowledge transfer" OR "technology transfer") AND (farmers OR agriculture OR "rural communities") AND ("multi-agent systems" OR "agentic AI" OR "multiagent AI")*
> *"knowledge transfer to farmers" AND ("multi-agent systems" OR "agentic AI")*
> *TITLE-ABS-KEY(("knowledge transfer" OR "technology transfer") AND (farmers OR agriculture) AND ("multi-agent systems" OR "agentic AI"))*

Este procedimiento permitió identificar un corpus inicial de 533 documentos publicados mayoritariamente en el periodo 2020-2026, lo que refleja el estado del arte de la denominada "Agricultura 5.0" (Srinivasu et al., 2026).

Fase 2: Cribado manual y criterios de relevancia. Un total de 321 artículos fueron evaluados mediante un análisis cualitativo directo por parte del autor, basándose en la lectura crítica de títulos y resúmenes. Los criterios de inclusión se centraron en estudios que demostraran la aplicabilidad de los Sistemas Multi-Agente (MAS) en la extensión agrícola, la resolución de barreras lingüísticas y el manejo de la salud del suelo bajo el sistema U.S. Soil Taxonomy (Bonifacio et al., 2025). Se excluyeron trabajos puramente teóricos sobre algoritmos computacionales que no presentaran una validación o aplicabilidad en el dominio agronómico o rural.

Fase 3: Cribado asistido por IA y validación humana (Human-in-the-loop). Para los 190 documentos restantes, se emplearon flujos de trabajo de procesamiento de lenguaje natural (NLP) mediante la herramienta Gemini 3.5 Pro usado el 13 de mayo de 2026. La IA se encargó de la extracción automatizada de arquitecturas de modelos, poblaciones objetivo y resultados cuantitativos clave de varios de los artículos. No obstante, para mitigar el riesgo de "alucinaciones" (generación de datos falsos) y asegurar la alineación ética y técnica del contenido, se aplicó un protocolo riguroso de validación humana (Sinha, 2026). Este enfoque se alinea con el paradigma de IA generativa con humano-en-el-ciclo, donde la máquina propone soluciones y el experto las revisa y selecciona, combinando el conocimiento de dominio con la capacidad de síntesis de los modelos generativos (Nagabhyru & Jyothi Babu, 2025). De los documentos pre-procesados por IA, se seleccionaron 22 artículos de alta pertinencia, los cuales fueron contrastados manualmente con su fuente original y analizados posteriormente con lectura por parte del autor. Finalmente, tras una revisión de integridad y coherencia se agregaron otros 45 artículos a criterio del autor de acuerdo a la lectura de los abstracts y títulos, en total se consolidó un núcleo de 67 artículos científicos que constituyen la base bibliográfica de esta revisión, garantizando que el corpus generado se armonice con la realidad científica mediante un enfoque sistémico y riguroso.

Arquitecturas Agénticas y la Superación del "Ruido Semántico"

Uno de los obstáculos más persistentes en la transferencia de tecnología agrícola es

el denominado “ruido semántico”, definido como la barrera de comunicación que surge cuando el léxico técnico de los investigadores colisiona con los dialectos regionales y las lógicas empíricas de los productores (Briese, 2019). Mientras que la ciencia formal describe el suelo mediante categorías taxonómicas estandarizadas como la U.S. Soil Taxonomy, los agricultores emplean términos vernáculos cargados de significado operativo por ejemplo, “gumbo” para referirse a suelos arcillosos de alta pegajosidad o “stools” para los macollos que los sistemas de extensión tradicionales a menudo no logran decodificar (Briese, 2019, Swati et al., 2026). Para superar esta desconexión, han emergido arquitecturas de IA Agéntica que trascienden el modelo de respuesta estática de los chatbots convencionales. A diferencia de la IA generativa reactiva, un sistema agéntico se caracteriza por su capacidad de percibir, razonar, planificar y actuar de manera autónoma e interactiva (Amjad et al., 2025, Bonifacio et al., 2025).

Frameworks de vanguardia como AgroAskAI implementan una estructura de “cadena de responsabilidad” donde agentes especializados colaboran para interpretar la intención del usuario (Cantonjos & Biswas, 2026). En este modelo, un Agente de Parsing descompone la consulta del agricultor para extraer el contexto geográfico y temporal, mientras que un Agente Revisor actúa como una capa de gobernanza interna, detectando y mitigando posibles “alucinaciones” antes de emitir una recomendación (Cantonjos & Biswas, 2026).

Un componente crítico en estas arquitecturas es la Generación Aumentada por Recuperación (RAG). El sistema Agentic RAG permite que la IA no dependa únicamente de su memoria interna, sino que recupere dinámicamente información de bases de conocimiento curadas y verificadas por agencias gubernamentales o centros de investigación (Akbar et al., 2025, English, 2025). Esto garantiza que, incluso cuando el agricultor utiliza un lenguaje coloquial, el sistema pueda anclar su respuesta en literatura científica sobre órdenes de suelo específicos, como los Andisols o Vertisols del Valle del Cauca, adaptando el tecnicismo a un lenguaje práctico y accionable (High et al., 2026, Trujillo Obando et al., 2024).

Asimismo, el marco OpenAg propone una “democratización de la inteligencia agrícola” mediante la integración del conocimiento tácito la pericia intuitiva desarrollada por el campesino tras años de práctica con modelos de razonamiento causal (Thudumu & Fisher, 2025). Al emplear grafos de conocimiento neurales, estos sistemas pueden “aprender” la jerga regional de manera similar a como se han desarrollado agentes para el parsing de lenguas antiguas con escasos datos, utilizando reglas gramaticales y ontologías para normalizar terminologías heterogéneas (Singleton et al., 2024, Thudumu & Fisher, 2025).

En última instancia, estas arquitecturas no solo transmiten datos, sino que pueden incluso facilitar una “mesa redonda virtual” donde agentes de suelo, clima y mercado, cada uno con acceso a datos actualizados y científicos, negocien un consenso para ofrecer soluciones argumentadas que respeten la identidad cultural y la realidad biofísica del campo (Budaev et al., 2018, Das et al., 2026).

Gestión Autónoma del Suelo y Sostenibilidad Edáfica

La transición hacia una gestión autónoma del suelo representa un cambio de paradigma en la agronomía moderna, donde el enfoque tradicional de calendarios fijos de fertilización es sustituido por una intervención dinámica basada en la necesidad real del ecosistema edáfico.

Suelos Ecuatoriales 55 (1 y 2): 24-35. https://doi.org/10.47864/se552025p2435

En la agricultura convencional, es frecuente observar el fenómeno del "consumo de lujo" de nutrientes, en el cual la aplicación excesiva de fertilizantes no se traduce en un incremento proporcional del rendimiento, sino que aumenta el riesgo de lixiviación de nitratos y la degradación de la salud del suelo. Esta problemática es relevante en regiones como el norte del departamento del Huila, donde la erosión, la salinización, la compactación y la contaminación inciden directamente sobre la calidad del suelo y sus funciones ecosistémicas (Torrente-Trujillo & Aristizábal-Martelo, 2024). Evidencia empírica reciente demuestra que los sistemas de IA Agéntica, particularmente aquellos fundamentados en el Aprendizaje por Refuerzo Multiagente (MARL), logran una optimización de recursos sin precedentes.

Estudios realizados bajo condiciones de campo demostraron que el uso de agentes autónomos permite reducir el consumo de fertilizantes nitrogenados en un 56.7% en comparación con las prácticas tradicionales del agricultor, manteniendo o incluso incrementando los índices de rendimiento (Amjad et al., 2025). Este ahorro no es solo económico, sino ambiental, al reducir la huella de carbono y prevenir la acidificación del medio edáfico. Asimismo, la preservación de la salud edáfica implica mitigar la contaminación por metales pesados, cuya fitotoxicidad puede aliviarse mediante enmiendas como el silicato de magnesio (Avellaneda & Gutiérrez Toro, 2024). Para cuantificar estos avances, se ha integrado el Índice de Salud del Suelo (SHI) como una métrica compuesta que evalúa el pH, el contenido de materia orgánica y la disponibilidad de macronutrientes (NPK).

Los marcos agénticos han demostrado una capacidad superior para mantener un SHI estable alrededor de 0.64 frente a 0.52 en prácticas tradicionales, evitando la pérdida extrema de nutrientes y mejorando la estructura física del suelo (Amjad et al., 2025). En otros sistemas de agricultura inteligente, la implementación de estos modelos ha permitido reducciones del 20% en la demanda de fertilizantes y ahorros de hasta el 47% en el recurso hídrico, demostrando que la precisión algorítmica es un pilar importante para la sostenibilidad (Hu, 2026). En esa misma línea, sistemas de producción integrada como la acuaponía que combinan acuicultura e hidroponía demuestran el potencial de la biorremediación para reutilizar efluentes y producir alimentos con menor impacto ambiental (Aza-Bastidas et al., 2024).

Un desafío técnico resuelto por estas arquitecturas es el manejo de la heterogeneidad edáfica bajo el sistema U.S. Soil Taxonomy. Los agentes agénticos han mostrado eficacia en la interpretación de órdenes complejos, como los Andisols con rasgos redoximórficos, donde se presenta la denominada "paradoja hidromórfica" (Trujillo Obando et al., 2024). En estos suelos, la superposición de epipedones arcillosos sobre horizontes arenosos restringe el potencial químico debido a limitaciones de aireación y asfixia radicular. Los sistemas agénticos, al integrar sensores de humedad y modelos de Generación Aumentada por Recuperación (RAG), pueden proponer manejos de drenaje subsuperficial y optimizar la Eficiencia del Uso del Agua (WUE), garantizando que el "umbral estructural" del suelo no descienda por debajo de los límites biológicos funcionales. La evidencia empírica respalda esta capacidad: sistemas de fertirriego automatizados con sensores de humedad han demostrado que el ajuste de la lámina de agua según el coeficiente de cultivo optimiza simultáneamente el rendimiento y la calidad de los frutos (Lucena Riascos et al., 2024). De manera complementaria, la integración de datos satelitales con variables geoambientales permite estimar la humedad superficial del suelo a escala local con mayor resolución que la ofrecida por los sensores

remotos por sí solos, fortaleciendo las capacidades de monitoreo de los sistemas agénticos (Serrano Amaya, 2024).

Finalmente, el manejo autónomo facilita la administración de órdenes como los Vertisols caracterizados por arcillas expansivas y micro-relieves de gilgai y los Inceptisols, adaptando las dosis de riego y nutrientes a la capacidad de intercambio catiónico (CICA) específica de cada lote (Marín-Pimentel et al., 2024). A su vez, el monitoreo de la salinidad edáfica resulta crucial, pues altos contenidos de sales afectan el desarrollo de los cultivos y modifican la disponibilidad de nutrientes como el fósforo (Combatt et al., 2024). De hecho, la variabilidad espacial de las propiedades físicas del suelo exige este tipo de manejo diferenciado, pues el manejo estandarizado de la nutrición sin considerar las particularidades de cada finca limita el rendimiento de los cultivos (Ramírez Pisco & Leiva Rojas, 2024). Esta capacidad de respuesta localizada no solo democratiza el acceso a la agronomía de precisión, sino que promueve una gobernanza del suelo éticamente anclada en la preservación de la salud ecosistémica a largo plazo (Burbano Orjuela, 2022).

La "Mesa Redonda Virtual" y la Simulación mediante Gemelos Digitales

La toma de decisiones en la agricultura de precisión requiere procesar variables heterogéneas que a menudo entran en conflicto, como la necesidad de riego frente a la proximidad de una tormenta, o la aplicación de fertilizantes ante una posible infestación de plagas. Para resolver esta complejidad, la IA agéntica introduce el concepto de la "mesa redonda virtual", una arquitectura de coordinación donde agentes especializados (suelo, clima, cultivo, mercado) negocian un consenso para ofrecer una recomendación única y coherente (Budaev et al., 2018, Bonifacio et al., 2025). En este modelo, el sistema no se limita a entregar una predicción aislada, sino que gestiona secuencias de decisiones bajo condiciones de observabilidad parcial y objetivos agronómicos contrapuestos (Bonifacio et al., 2025). Esta coordinación bajo incertidumbre encuentra un formalismo sólido en los procesos de decisión de Markov parcialmente observables multi-agente (MPOMDP), que integran sensores multimodales y razonamiento consciente de la incertidumbre en un flujo de percepción-decisión-acción en circuito cerrado (Davcev et al., 2026).

Un habilitador crítico de esta capacidad es la tecnología de Gemelos Digitales (Digital Twins). Se define a un gemelo digital como una representación virtual de un sistema físico que se actualiza continuamente mediante datos de sensores en tiempo real y modelos analíticos (Gund et al., 2025). A diferencia de las simulaciones tradicionales que son estáticas y unidireccionales, los gemelos digitales en la agricultura permiten una sincronización bidireccional, permitiendo a los agentes agénticos explorar escenarios del tipo "¿qué pasaría si...?" en un entorno virtual seguro (Gund et al., 2025, Chavhan & Sarode, 2026). Esta noción de experimentación segura se puede extender al ámbito de las políticas agrícolas mediante sociedades artificiales de agentes cuyas decisiones se fundamentan en normas y valores empíricos de los actores, permitiendo probar escenarios y observar comportamientos emergentes antes de su implementación (Gauci & Dingli, 2025).

La integración de sistemas multi-agente con gemelos digitales permite validar las estrategias de decisión como una dosis específica de fertilización o un ciclo de riego antes de su implementación en el campo real, lo que reduce drásticamente el riesgo operativo y económico para el pequeño productor (Chavhan & Sarode, 2026). Por ejemplo, ante la incertidumbre climática de

Suelos Ecuatoriales 55 (1 y 2): 24-35. https://doi.org/10.47864/se552025p2435

una cuenca tropical, los agentes pueden simular el impacto de eventos extremos de lluvia sobre el almacenamiento hídrico de un suelo con rasgos redoximórficos, ajustando el plan de manejo preventivamente para evitar la asfixia radicular y la degradación estructural (Trujillo Obando et al., 2024, Gund et al., 2025). En esta línea, la comprensión de los mecanismos de formación de costras estructurales sellado superficial que degrada los agregados del suelo permite a los sistemas agénticos anticipar y prevenir este tipo de deterioro edáfico en sus recomendaciones de manejo (Pinzón Pinto & Sánchez Espinosa, 2024).

Finalmente, esta arquitectura de "mesa redonda" respaldada por gemelos digitales facilita el aprendizaje organizacional. Los resultados de cada intervención simulada y ejecutada se registran de manera sistemática, permitiendo que el sistema refine sus modelos de razonamiento y que el agricultor desarrolle una mayor confianza en las recomendaciones de la IA, al visualizar el sustento técnico detrás de cada acción sugerida (Sinha, 2026, Chavhan & Sarode, 2026). Esta capacidad de refinamiento se ve potenciada por el aprendizaje por transferencia, que permite a los agentes generalizar el conocimiento adquirido hacia nuevas tareas y contextos, superando la fragilidad de los modelos especializados y aproximándose a la flexibilidad cognitiva humana (Nong, 2025).

Gobernanza, Ética y Aprendizaje Transformativo

La integración de la IA agéntica en la extensión rural trasciende la mera automatización técnica para constituirse como un proceso sociotécnico que demanda una infraestructura ética robusta. Siguiendo el pensamiento sistémico de Burbano Orjuela (2022), el recurso edáfico posee un valor irremplazable para el avance de la sociedad, y su gestión debe estar intrínsecamente ligada a los valores, la cultura y la educación. En este marco, la efectividad de los sistemas multi-agente depende de la construcción de una confianza que, si bien es frágil, puede fortalecerse mediante la transparencia algorítmica y la alineación de objetivos con las necesidades reales del productor (High et al., 2026, Sinha, 2026).

Para operativizar esta confianza, se propone la adopción de marcos de gobernanza como el TRACE (Trust, Review, Accountability, Critique, Explainability), el cual incorpora anclas de supervisión directamente en los flujos de trabajo de los agentes para garantizar que cada decisión sea auditable (Sinha, 2026). Este enfoque asegura que la autonomía técnica no devenga en una delegación de responsabilidad sin control humano, permitiendo una trazabilidad completa desde la recomendación de fertilización hasta la base científica que la sustenta (Sinha, 2026). Al respecto, la implementación de "Agentes Revisores" dentro de arquitecturas como AgroAskAI permite una auditoría interna en tiempo real, mitigando riesgos de alucinación y garantizando que las sugerencias sean coherentes con las políticas de conservación de suelos (Cantonjos & Biswas, 2026).

Un componente crítico para mitigar la percepción de la IA como una "caja negra" es el desarrollo de una IA Explicable (XAI). Mediante el uso de herramientas de interpretación, los sistemas agénticos pueden cuantificar la contribución de variables como el pH o el nitrógeno en las dosis sugeridas, facilitando un aprendizaje transformador donde el agricultor recupera su agencia al cuestionar y validar los supuestos del sistema (High et al., 2026). Sin embargo, persisten dilemas sobre la soberanía de datos y la brecha digital; existe el riesgo de un "monopolio del conocimiento" donde los pequeños productores rurales sean relegados a meros proveedores de información para grandes corporaciones tecnológicas (Sarfo et

al., 2025, Hu, 2026).

En última instancia, el éxito de la IA agéntica en el manejo edáfico sostenible radica en mantener un enfoque estricto de "humano en el ciclo" (human-in-the-loop). La tecnología debe actuar como un catalizador de un "diálogo de saberes", donde los protocolos de seguridad incluyan capas de restricción agronómica y mecanismos de anulación manual ante eventos extremos o incertidumbre en los sensores (Amjad et al., 2025). De esta forma, la IA no sustituye la sabiduría y creatividad del campesino, sino que la potencia en un entorno de aprendizaje mutuo y responsabilidad compartida (High et al., 2026). Este aprendizaje social encuentra antecedentes en la evaluación integrada participativa, donde los modelos computacionales actúan como herramientas que permiten a los actores explorar las consecuencias de sus opciones y negociar perspectivas convergentes hacia la acción colectiva (De Kraker et al., 2011).

REFERENCIAS

Akbar N.A., Dembani R, Lenzitti B, Tegolo D. (2025) RAG-Driven Memory Architectures in Conversational LLMs - A Literature Review with Insights into Emerging Agriculture Data Sharing. IEEE Access 13: 1-28. DOI: 10.1109/ACCESS.2025.3589241.

Amjad M, Tehseen R, Nasr K, Aslam F, Awan M.M., Omer U. (2025) Agentic AI for Autonomous Soil and Fertilization Management for Agriculture Sustainability. Int J Innov Sci Technol 7 (4): 2997-3017 DOI: https://doi.org/10.3390/agriengineering8040147

Avellaneda Y.A., Gutiérrez Toro N. (2024). Efecto de la antigorita (silicato de magnesio) en el alivio de estrés por metales pesados. Suelos Ecuatoriales 54 (1y2): 23-30. DOI: 10.47864/se542024p2330.

Aza-Bastidas Al, Castro-Pantoja Ny, Cuaran-López Dm, Rosero-Obando Ba, García-Criollo R, Burgos-Arco Aj, Sánchez Ortiz Ia. (2024). Efecto de la biorremediación en la calidad de agua en un sistema acuapónico con carpa koi y lechuga. Suelos Ecuatoriales 54 (1y2): 13-22. DOI: 10.47864/se542024p4857.

Berger T (2001). Agent-based spatial models applied to agriculture: a review. Agric Econ 25: 245-260. DOI: 10.1016/S0169-5150(01)00082-2.

Bonifacio A, Iele I, Romoli G, Tortora M, Soda P. (2025). Agentic AI in Agriculture: Towards Automatic Farming Systems. SSRN Preprint 6716658: 1-15. DOI: http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.6716658.

Briese L. (2019) Science Communication in Agriculture: The Role of the Trusted Adviser.

Budaev D, Lada A, Simonova E, Skobelev P, Travin V, Yalovenko O, Voshchuk G, Zhilyaev A. (2018). Conceptual design of smart farming solution for precise agriculture. Int J Des Nat Ecodyn 13 (3): 307-314. DOI:10.2495/DNE-V13-N3-307-314.

Burbano Orjuela H. (2014). Educación para la sostenibilidad. Suelos Ecuatoriales 44 (2): 138-150. Disponible en: https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=7831481

Burbano Orjuela H. (2022). Educación, sociedad y naturaleza en la gestión sostenible del suelo. Suelos Ecuatoriales 52 (1y2): 112-129. DOI: 10.47864/SE(52)2022p112-129_158.

Cantonjos Nap, Biswas A. (2026). AgroAskAI: A Multi-Agentic AI Framework for Supporting Smallholder Farmers' Enquiries Globally. Proc AAAI Conf Artif Intell 40: 40217-40223. DOI: DOI: 10.48550/arXiv.2512.14910.

Chavhan Sd, Sarode Ar. (2026). Building A Transparent Multi-Agent AI System to Help Farmers Make Better Precision-Farming Decisions Using Digital Twins in Changing Climates. Int J Sci Res Eng Manag 10: 222-230. DOI: 10.55041/IJSREM.IBFE032

Combatt C, Hernández B, Mercado L, Quiroz B, Burgo W, Gómez G, López P. (2024). Respuesta de frijol caupí (Vigna unguiculata) a la aplicación de dos niveles de fósforo en el suelo y 7 niveles de salinidad. Suelos Ecuatoriales 54 (1y2): 1-12. DOI: 10.47864/se542024p112

Das J, Gupta S, Gupta K, Bholankar O, Kodabagi G. (2026). AgroVision-A multi agentic AI system for sustainable farming. Int J Sci Res Arch 19 (1): 624-633. DOI: 10.30574/ijsra

Davcev D, Kalajdziski S, Dimitrovski I, Kitanovski I, Mitreski K. (2026). Agentic AI-Based IoT Precision Agriculture Framework—Our Vision and Challenges. AgriEngineering 8 (4): 147. DOI: 10.3390/agriengineering8040147

De Kraker J, Kroeze C, Kirschner P. (2011). Computer models as social learning tools in participatory integrated assessment. Int J Agric Sustain 9 (2): 297-309. DOI: 10.1080/14735903.2011.582356

Elbasi E, Mostafa N, Alarnaout Z, Zreikat Ai, Cina E, Varghese G, Shdefat A, Topcu Ae, Abdelbaki W, Mathew S, Zaki C. (2023) .Artificial Intelligence Technology in the Agricultural Sector: A Systematic Literature Review. IEEE Access 11: 171-202. DOI: 10.1109/ACCESS.2022.3232485

English V. (2025). Comparing traditional AI, agentic AI and agentic RAG for dialogic online education. Asian J Educ Train 11 (4): 198-210. DOI: 10.20448/edu.v11i4.7926

Gauci Gp, Dingli A. (2025). Wisdom of AI Crowds: A Proposed Three-Phase Policy Simulation Framework. Eur J Pol Sci Stud 8 (2): 202-204. DOI: DOI:10.46827/ejpss.v8i2.2096.

Gund R, Badgujar Cm, Samiappan S, Jagadamma S. (2025). Application of Digital Twin Technology in Smart Agriculture: A Bibliometric Review. Agriculture 15 (17): 1799. DOI: 10.3390/agriculture15171799

Havlik D, Chettakattu A, Karagiannis V, Etminan G, Pale P. (2025). Harnessing GenAI for Climate Change Knowledge Management with SumQA: Use Cases, System Design, and Experimental Evaluation. Research Square Preprint: 1-29. DOI: 10.21203/rs.3.rs-6344237/v1

High C, Singh N, Nemes G. (2026). Artificial Intelligence for Agricultural Extension: Supporting Transformative Learning Among Smallholder Farmers. J Dev Policy Pract 11 (1): 61-80. DOI: https://doi.org/10.1177/24551333251345224

Hu, Zhehao. **(2026).** Artificial Intelligence Reshaping Agricultural Knowledge Systems: Paradigm Shifts and Implementation Challenges. MedScien. 3. DOI 10.61173/zn45cz07.

Lucena Riascos Ks, García-Criollo R, Fajardo Fajardo DF. **(2024).** 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. Suelos Ecuat 54 (1y2): 48-56. DOI: 10.47864/se542024p5866.

Marín-Pimentel Ge, Rueda-Saa G, Menjívar-Flores Jc. (2024). Efecto del orden de suelo en la correlación entre sus propiedades y los metales pesados en el Valle del Cauca, Colombia. Suelos Ecuatoriales 54 (1y2): 57-67. DOI: 10.47864/se542024p6778.

Murad M, Murad M, Nasir U, Shafiq Mf. (2026). Agentic AI Framework to Automate Traditional Farming for Smart Agriculture. AgriEngineering 8 (1): 8. DOI: 10.3390/agriengineering8010008.

Mzumara Hw, Mulepa J. (2025). Agricultural Advisory Management System with AI Powered Chat-Bot. Int J Innov Sci Res Technol 10 (11): 1563-1591. DOI: 10.38124/ijisrt/25nov004.

Nagabhyru Kc, Jyothi Babu A. (2025). Human In The Loop Generative AI: Redefining Collaborative Data Engineering for High Stakes Industries. Metall Mater Eng 31 (7): 122-141.

Nong Y. (2025). Transfer Learning in Agentic Systems: Improving Cross-Task Knowledge Application in AI Agents. Research Square Preprint: 1-12. DOI: 10.21203/rs.3.rs-5911274/v1.

Pinzon Pinto A, Sánchez Espinosa J.A. (2024). Factores y mecanismos de formación de costras calcáreas estructurales en suelos. Suelos Ecuatoriales 54 (1y2): 40-47. DOI: 10.47864/se542024p4047.

Prajapati Cs, Priya Nk, Bishnoi S, Vishwakarma Sk, Buvaneswari K, Shastri S, Tripathi S, Jadhav A. (2025). The Role of Participatory Approaches in Modern Agricultural Extension: Bridging Knowledge Gaps for Sustainable Farming Practices. J Exp Agric Int 47 (2): 204-222. DOI: 10.9734/jeai/2025/v47i23281.

Ramírez Pisco R, Leiva Rojas E.I. (2024). Variabilidad espacial de propiedades físicas del suelo y respuesta inicial del banano (Musa AAA cv. Williams) en Urabá, Colombia. Suelos Ecuatoriales 54 (1y2): 77-83. DOI: 10.47864/se542024p8894.

Sarfo Jb, Aremora S, Adebote Mo, Balogun Km, Fashina At. (2025). Generative AI: A new frontier for agric extension service in Africa - revolutionizing farmer information access. Comput Sci IT Res J 6 (2): 94-103. DOI:10.51594/csitrj.v6i2.1870.

Serrano Amaya Dh. (2024). Estimación espacial de la humedad superficial del suelo mediante integración de datos satelitales y variables geoambientales en una cuenca tropical andina. Suelos Ecuatoriales 54 (1y2): 31-39. DOI: 10.47864/se542024p3139.

Singleton B, Chun J, Elkins K. (2024). Ancient Greek Parsing with AI: Unpacking Complex Word Composition with Agentic Systems. Digital Humanities Kenyon: 1-5.

Sinha A, Basu D, Priyadarshi P, Ghosh A, Sohane Rk (2022). Farm Typology for Targeting Extension Interventions. Front Environ Sci 10: 823338. DOI: 10.3389/fenvs.2022.823338.

Sinha N (2026). Building Trust in Agentic AI: TRACE Framework for Policy-Driven Multi-Agent System Design. Int J Curr Sci Res Rev 9 (2): 1024-1035. DOI: 10.47191/ijcsrr/V9-i2-46.

Srinivasu Pn, Pavate A, Jayalakshmi G, Shafi J, Choi J, Ijaz MF. (2026). Agentic AI for smart and sustainable precision agriculture. Front Plant Sci 16: 1706428. DOI: 10.3389/fpls.2025.1706428.

Swati Nlp, Gupta Sv, Duddela Ns, Parvathy Lr (2026). Agentic AI-driven autonomous decision support system for smart agriculture. Sci Rep 16: 9972. DOI: 10.1038/s41598-026-39472-w.

Thudumu S, Fisher J. (2025). OpenAg: Democratizing Agricultural Intelligence. arXiv Preprint: 2506.04571. DOI: https://doi.org/10.48550/arXiv.2506.04571.

Torrente-Trujillo A, Aristizabal-Martelo H.L. (2024). Degradación y calidad del suelo Panoramaregionalenelnortedeldepartamento del Huila. Suelos Ecuatoriales 54 (1y2): 84-95. DOI: 10.47864/se542024p1322.

Trujillo Obando O.E., Torres Prieto E.A., Torrente Trujillo A. (2024). Dinámica y almacenamiento hídrico en un suelo con rasgos redoximórficos del valle interandino tropical: implicaciones del umbral estructural en condiciones de endosaturación. Suelos Ecuatoriales 54 (1y2): 68-76. DOI: 10.47864/se542024p7987.

SUELOS ECUATORIALES

Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo

https://doi.org/10.47864/se552025p3651

Agricultura 5.0: innovación tecnológica, capital humano y sostenibilidad. Revisión exploratoria

Agriculture 5.0 and Sustainable Soil Management: Technological Innovation and Human Capital. An Exploratory Review

Yovany Ospina Nieto[1*] ✉, Oscar Eduardo Trujillo Obando[2] ✉, Jhony Armando Benavides-Bolaños[3] ✉

[1*] Universidad Nacional Abierta y a Distancia (UNAD), Palmira, Colombia.
[2] Universidad Nacional de Colombia sede Palmira, Colombia.
[3] Universidad del Valle, Escuela de Ingenieríia de los Recursos Naturales y del Ambiente (EIDENAR) Cali, Colombia

Vol. 55 (1 y 2) de 2025 | pp: 36-51 | ISSN 0562-5351 E-ISSN 2665-6558 | REC.: 06/08/2026 - ACEP.: 28/08/2026

RESUMEN

El objetivo fue analizar cómo la literatura científica relaciona las tecnologías de la Agricultura 5.0 con el capital humano y las condiciones institucionales, y cómo esta articulación puede contribuir a la productividad, la sostenibilidad y la resiliencia de los sistemas agrícolas, con atención a sus implicaciones para el manejo del suelo. Se realizó una revisión exploratoria de la literatura, reportada de acuerdo con los elementos aplicables de PRISMA 2020. Se examinaron 29 documentos publicados entre 2019 y 2025; 27 fueron incluidos en la revisión y 14 integraron el corpus analítico principal. La evidencia se examinó mediante una síntesis temática y un mapa exploratorio de relaciones conceptuales visualizado mediante VOSviewer. La literatura relaciona la inteligencia artificial, el Internet de las cosas, la robótica, los drones, los gemelos digitales y el análisis de datos con el monitoreo de los sistemas productivos, el uso eficiente del agua y los nutrientes, la predicción de riesgos y la toma de decisiones. Sin embargo, la adopción y los beneficios dependen de la conectividad, la financiación, las competencias digitales, el soporte técnico, la gobernanza de datos y el acceso equitativo. Se concluye que la Agricultura 5.0 puede contribuir a sistemas agrícolas más sostenibles y resilientes cuando la innovación tecnológica se articula con el conocimiento agronómico, las capacidades locales, los servicios de extensión y políticas que incluyan a los pequeños productores.

Palabras clave: Salud del suelo; digitalización rural; competencias digitales; gobernanza de datos; colaboración humano-máquina.

ABSTRACT

The objective was to analyze how the scientific literature relates Agriculture 5.0 technologies to human capital and institutional conditions, and how this articulation may contribute to productivity, sustainability, and resilience in agricultural systems, with attention to its implications for soil management. An exploratory literature review was conducted and reported according to the applicable items of PRISMA 2020. Twenty-nine documents published between 2019 and 2025 were examined; 27 were included in the review and 14 comprised the main analytical corpus. The evidence was examined through thematic synthesis and an exploratory conceptual map visualized using VOSviewer. The literature relates artificial intelligence, the Internet of Things, robotics, drones, digital twins, and data analytics to agricultural-system monitoring, efficient use of water and nutrients, risk prediction, and decision-making. However, adoption and benefits depend on connectivity, funding, digital skills, technical support, data governance, and equitable access. Agriculture 5.0 can contribute to more sustainable and resilient agricultural systems when technological innovation is combined with agronomic knowledge, local capacities, extension services, and policies that include smallholder producers.

Keywords: Soil health; rural digitalization; digital skills; data governance; human–machine collaboration.

INTRODUCCIÓN

El suelo es un componente fundamental de los sistemas agrícolas, pues interviene en el almacenamiento y suministro de agua y nutrientes, el desarrollo de los cultivos y la regulación de procesos ambientales. Sin embargo, la agricultura enfrenta presiones asociadas con el cambio climático, la degradación del suelo, la escasez de agua, la pérdida de biodiversidad, la volatilidad de los mercados, el aumento de los costos de producción y la necesidad de garantizar la seguridad alimentaria. Estas condiciones demandan modelos productivos capaces de mejorar la eficiencia sin aumentar la presión sobre los ecosistemas.

En este contexto, la digitalización agrícola ha favorecido el desarrollo de sensores, sistemas de monitoreo, teledetección, automatización y análisis predictivo para apoyar la gestión de cultivos, animales, recursos naturales y cadenas de suministro. En particular, estas herramientas pueden contribuir al seguimiento de variables productivas y edáficas, así como al uso más eficiente del agua, los nutrientes y otros insumos agrícolas (Fountas et al. 2024; Sharma et al. 2024).

La Agricultura 4.0 se caracterizó por la incorporación de sensores, sistemas ciberfísicos, inteligencia artificial, robótica, computación en la nube y análisis de datos. La Agricultura 5.0 conserva estas capacidades, pero las articula con una perspectiva centrada en las personas, la sostenibilidad y la resiliencia. Por tanto, no propone sustituir de manera generalizada al agricultor por máquinas, sino promover una colaboración en la que los sistemas tecnológicos procesen información y ejecuten tareas repetitivas, mientras las personas aportan conocimiento contextual, criterio agronómico, supervisión y responsabilidad ética.

La Industria 5.0 constituye el marco conceptual de este enfoque. La Comisión Europea la define como un paradigma complementario a la Industria 4.0, orientado a superar una visión centrada exclusivamente en la eficiencia económica. Sus pilares son la centralidad humana, la sostenibilidad y la resiliencia (European Commission 2021). Aplicados a la agricultura, estos principios implican adaptar las tecnologías a la variabilidad biológica, climática y territorial de los sistemas productivos. La inteligencia artificial, la robótica, los drones, la automatización y los gemelos digitales pueden apoyar el monitoreo, la predicción de riesgos y la optimización del uso de recursos; sin embargo, sus beneficios dependen de la calidad de los datos, la conectividad, la formación, la financiación y la participación de los actores rurales (Demircioğlu et al. 2024; Fountas et al. 2024).

La adopción de estas tecnologías también plantea desafíos relacionados con la privacidad, la ciberseguridad, la gobernanza de los datos, la dependencia tecnológica y la posible exclusión de pequeños productores. En consecuencia, la innovación tecnológica no garantiza por sí misma una agricultura sostenible. Es necesario fortalecer las competencias digitales, agronómicas, analíticas y organizativas de agricultores, trabajadores, extensionistas y organizaciones rurales. Asimismo, deben promoverse políticas e instituciones que faciliten el acceso equitativo a la tecnología y que protejan la autonomía de las comunidades y la sostenibilidad de los recursos naturales.

Aunque el interés por la Agricultura 5.0 ha aumentado, una parte importante de la literatura se concentra en describir tecnologías y arquitecturas digitales. Es necesario profundizar en la manera en que dichas herramientas se articulan con el capital humano, el conocimiento agronómico y las condiciones institucionales, especialmente

en relación con el manejo sostenible del suelo y la inclusión de pequeños productores en contextos rurales latinoamericanos. Por ello, la pregunta orientadora de esta revisión fue: ¿Cómo se articulan las tecnologías de la Agricultura 5.0, el capital humano y las condiciones institucionales, y qué implicaciones tienen para la sostenibilidad y el manejo del suelo? El objetivo fue analizar cómo la literatura científica describe la relación entre la Agricultura 5.0, la innovación tecnológica, el capital humano y las condiciones institucionales, con énfasis en sus contribuciones potenciales a la productividad, la sostenibilidad, la resiliencia y el manejo sostenible del suelo.

Fundamentación conceptual

Evolución de la industria 4.0 a la industria 5.0. La Industria 4.0 se asocia con la integración de sistemas ciberfísicos, Internet de las cosas, inteligencia artificial, automatización, robótica, computación en la nube y análisis de grandes volúmenes de datos. Su propósito principal ha sido mejorar la conectividad, la eficiencia operativa y la toma de decisiones basada en información.

La Industria 5.0 no sustituye a la Industria 4.0, sino que amplía sus posibilidades mediante una orientación centrada en las personas, la sostenibilidad y la resiliencia (Breque et al. 2021). Por tanto, no constituye únicamente una nueva etapa tecnológica, sino un marco sociotécnico que cuestiona que la eficiencia económica sea el único criterio para valorar la innovación. La tecnología debe contribuir también al bienestar de los trabajadores, las comunidades, las organizaciones y el medioambiente (European Commission 2021).

La centralidad humana implica que las personas mantengan un papel activo en el diseño, la supervisión y el uso de los sistemas tecnológicos. En el sector agrícola, esto supone que la inteligencia artificial, los robots y los algoritmos apoyen la interpretación de información y la ejecución de tareas, sin eliminar el conocimiento agronómico, la experiencia territorial ni la responsabilidad humana. En este artículo, el capital humano se entiende como una condición habilitante para la Agricultura 5.0, y no como un cuarto pilar formal de la Industria 5.0. Incluye conocimientos agronómicos, competencias digitales, capacidad analítica, criterio ético y habilidades para tomar decisiones en contextos productivos cambiantes.

La resiliencia se refiere a la capacidad de los sistemas productivos para anticipar, enfrentar, adaptarse y recuperarse de perturbaciones climáticas, sanitarias, económicas y logísticas. En la Industria 5.0, este concepto no se limita a mantener la continuidad de las operaciones, sino que también comprende la capacidad de aprender, innovar y transformar los sistemas frente a condiciones de incertidumbre (Breque et al. 2021; Szara 2025). En la agricultura, la resiliencia implica mantener las funciones productivas y ambientales del sistema, incluida la capacidad del suelo para sostener los cultivos y regular el agua y los nutrientes.

La sostenibilidad integra las dimensiones ambiental, económica y social de la producción. Desde esta perspectiva, no consiste únicamente en reducir el consumo de energía, las emisiones o los residuos, sino también en conservar los recursos naturales, garantizar la viabilidad económica y promover una distribución equitativa de los beneficios tecnológicos (Rame et al. 2024). En el ámbito agrícola, la sostenibilidad debe relacionarse con el manejo responsable del suelo, el uso eficiente del agua y los nutrientes, la conservación de la biodiversidad y la reducción de los procesos de degradación. Por ello, las tecnologías de la Agricultura 5.0 adquieren valor cuando contribuyen simultáneamente a

Suelos Ecuatoriales 55 (1 y 2): 36-51. https://doi.org/10.47864/se552025p3651

la productividad, la protección ambiental y el bienestar de las comunidades rurales.

En conjunto, la evolución de la Industria 4.0 a la Industria 5.0 representa el tránsito desde una orientación centrada principalmente en la automatización y la eficiencia hacia una perspectiva sociotécnica basada en la colaboración entre personas y máquinas. Este marco permite comprender la Agricultura 5.0 como la aplicación de tecnologías digitales avanzadas a sistemas biológicos y territoriales, bajo criterios de centralidad humana, sostenibilidad y resiliencia.

La industria 5.0 y su relación con la agricultura. La Agricultura 5.0 puede entenderse como la aplicación de los principios de centralidad humana, sostenibilidad y resiliencia de la Industria 5.0 a los sistemas agroalimentarios. Este enfoque integra tecnologías digitales —como sensores, Internet de las cosas, inteligencia artificial, robótica, drones, gemelos digitales y análisis de datos— con conocimientos agronómicos, capacidades organizativas y saberes territoriales. Su finalidad no es automatizar la producción por sí misma, sino mejorar la calidad de las decisiones y generar valor económico, ambiental y social para los actores del sistema agroalimentario (Fountas et al. 2024; Haloui et al. 2024; Sharma et al. 2024).

La relación entre la Industria 5.0 y la Agricultura 5.0 no consiste en transferir directamente tecnologías industriales al campo. Los sistemas agrícolas están sujetos a variaciones biológicas, climáticas, edáficas y territoriales que no pueden controlarse completamente. Por ello, las tecnologías deben adaptarse a las condiciones específicas de cada unidad productiva y complementarse con el conocimiento de los productores, los técnicos y los servicios de extensión.

En el manejo del suelo, esta integración puede apoyar el monitoreo espacio-temporal de variables como la humedad, la temperatura, la conductividad eléctrica, la disponibilidad de nutrientes, la cobertura y la variabilidad del terreno. También puede contribuir a ajustar el riego, la fertilización y otras prácticas de manejo. Sin embargo, la utilidad de estas herramientas depende de la calidad de los datos, la conectividad, la capacidad de interpretación y la validación agronómica de las recomendaciones.

La Agricultura 5.0 articula, por tanto, automatización con supervisión humana, análisis algorítmico con conocimiento local, innovación productiva con protección ambiental y conectividad digital con participación rural. Su aporte debe evaluarse no solo por el aumento de la eficiencia técnica, sino también por sus efectos sobre la conservación del suelo, el uso de los recursos naturales, la inclusión de los pequeños productores y la capacidad de adaptación de los sistemas agroalimentarios.

Capital humano e innovación tecnológica. La innovación tecnológica comprende la creación, adopción y combinación de dispositivos, plataformas, procedimientos y formas de organización que modifican las prácticas agrícolas. No obstante, la disponibilidad de tecnología no garantiza por sí misma mejores resultados. Sus beneficios dependen de las capacidades de los usuarios para comprender la información, evaluar las recomendaciones y adaptarlas a las condiciones productivas y territoriales (Gumbi et al. 2023; Bálint et al. 2024).

En esta revisión, el capital humano se entiende como el conjunto de conocimientos, experiencias, habilidades digitales, capacidades analíticas y competencias organizativas disponibles entre productores, trabajadores, técnicos, extensionistas y administradores. Estas capacidades

funcionan como una condición habilitante de la Agricultura 5.0, porque permiten convertir los datos generados por sensores, plataformas y algoritmos en decisiones productivas pertinentes.

La inteligencia artificial centrada en las personas requiere que los usuarios puedan interpretar sus resultados, reconocer posibles errores o sesgos y aportar conocimiento contextual. En consecuencia, las competencias necesarias no son únicamente operativas; también incluyen pensamiento crítico, conocimientos agronómicos, comprensión de la protección de datos, capacidad para trabajar con sistemas automatizados y disposición para participar en procesos de aprendizaje continuo (Holzinger et al. 2024; Liu et al. 2024).

En el manejo del suelo, estas competencias permiten interpretar mapas, sensores y modelos predictivos, contrastar sus recomendaciones con la observación directa del terreno y decidir cuándo modificar las prácticas de riego, fertilización o conservación. Por ello, la capacitación debe superar el aprendizaje instrumental de una herramienta y fortalecer la capacidad de análisis, la autonomía tecnológica, la cooperación entre productores y la gestión colectiva de la información.

La formación de productores y técnicos debe articularse con los servicios de extensión, las asociaciones rurales, las cooperativas y las instituciones de investigación. Este acompañamiento es especialmente importante para los pequeños productores, quienes pueden enfrentar limitaciones de conectividad, financiación, infraestructura, soporte técnico y acceso a los mercados (Gumbi et al. 2023). Así, el capital humano no constituye un complemento de la innovación tecnológica, sino una condición estratégica para que la Agricultura 5.0 contribuya a sistemas productivos sostenibles, resilientes e inclusivos.

Diseño metodológico

Tipo de revisión y procedimiento general. Se realizó una revisión exploratoria de la literatura mediante un proceso sistematizado de búsqueda, selección, organización y síntesis de documentos científicos. El reporte metodológico se estructuró con base en los elementos aplicables de la declaración PRISMA 2020 (Page et al. 2021).

PRISMA se utilizó como guía para transparentar las etapas de identificación, selección y síntesis de la información. Debido al tamaño reducido y a la heterogeneidad conceptual del corpus, no se realizó un metaanálisis ni se estimaron efectos cuantitativos. Los resultados se presentan mediante síntesis temática y análisis descriptivo.

Fuentes de información y periodo de búsqueda. La búsqueda documental se realizó en repositorios institucionales y plataformas editoriales y académicas, entre ellas la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, la Comisión Europea, IOS Press, Wiley Online Library, MDPI, SAGE Journals, SpringerLink e IEEE Xplore. Se consideraron publicaciones comprendidas entre 2019 y 2025. El año 2019 se estableció como límite inferior para delimitar el análisis al periodo reciente de desarrollo conceptual de la Industria 5.0 y la Agricultura 5.0. La búsqueda se orientó a identificar documentos relacionados con tecnologías digitales, manejo agrícola, capital humano, sostenibilidad, resiliencia y condiciones institucionales

Estrategia de búsqueda. La estrategia de búsqueda se organizó mediante combinaciones de términos relacionados con la Industria 5.0, la Agricultura 5.0, los sistemas agrícolas, las tecnologías digitales y el manejo sostenible del suelo. La ecuación de búsqueda principal fue:

Suelos Ecuatoriales 55 (1 y 2): 36-51. https://doi.org/10.47864/se552025p3651

("Industry 5.0" OR "Agriculture 5.0" OR "Industry-Agriculture 5.0")
AND
(agricultur* OR farming OR "smart farming" OR "precision agriculture" OR agroecosystem*)
AND
(soil OR "soil health" OR "soil management" OR "soil quality" OR "digital soil mapping")
AND
("artificial intelligence" OR "Internet of Things" OR "digital twin*" OR robotics OR automation OR "big data" OR "cloud computing")

Los términos relacionados con capital humano, competencias digitales, sostenibilidad, resiliencia, inclusión y gobernanza de datos se utilizaron como categorías de selección y extracción de información. Esta decisión permitió evitar la exclusión de documentos relevantes que abordaran dichos temas utilizando expresiones diferentes. La sintaxis de la ecuación se adaptó a las características de cada plataforma consultada. Se eliminaron los registros duplicados y se revisó la pertinencia temática de los documentos recuperados.

Criterios de inclusión y exclusión. Se incluyeron documentos que cumplieran los siguientes criterios: 1. Publicaciones académicas o institucionales relacionadas con la Industria 5.0 o la Agricultura 5.0; 2. Estudios publicados entre 2019 y 2025; 3. Documentos con aplicación directa o potencial en sistemas agrícolas; 4. Trabajos que abordaran tecnologías digitales, manejo del suelo, uso eficiente de recursos, capital humano, sostenibilidad, resiliencia o inclusión rural y, 5. Publicaciones con información suficiente para identificar sus objetivos, aportes y principales conclusiones.

Se excluyeron: 1. Documentos centrados exclusivamente en manufactura sin aplicación agrícola; 2. Estudios limitados a Agricultura 4.0 que no incorporaran centralidad humana, sostenibilidad o resiliencia; 3. Registros duplicados; 4. Documentos sin relación directa con el objetivo de la revisión y, 5. Publicaciones cuya información no permitiera establecer su aporte al análisis.

Selección y composición del corpus. Durante el proceso de selección se examinaron 29 documentos. De este conjunto, 27 fueron incorporados a la revisión general y dos fueron excluidos por falta de relación temática con la Agricultura 5.0 y el manejo agrícola. De los 27 documentos incluidos, 14 conformaron el corpus analítico principal por su relación directa con las tecnologías de la Agricultura 5.0, la innovación tecnológica, el capital humano, la sostenibilidad y las condiciones de adopción. Los 13 documentos restantes se utilizaron como apoyo teórico, institucional o metodológico. Este grupo estuvo integrado por nueve referencias teóricas, tres documentos institucionales y una referencia metodológica. En consecuencia, el análisis diferenció entre el corpus analítico principal y las referencias complementarias. Las publicaciones excluidas no se utilizaron para sustentar los resultados ni la discusión.

Extracción y análisis de la información. La información se organizó en una matriz de análisis que incluyó autoría, año de publicación, región o país, tipo de documento, tecnología estudiada, aplicación agrícola, relación con el suelo, beneficios productivos y ambientales, capacidades humanas requeridas, barreras de adopción e implicaciones éticas, políticas e institucionales. Posteriormente, se realizó una síntesis temática del corpus analítico. Las categorías de análisis fueron:

1. Tecnologías habilitadoras; 2. Aplicaciones agrícolas y edáficas; 3. Productividad y eficiencia en el uso de recursos; 4. Sostenibilidad y resiliencia; 5. Capital humano y competencias digitales; 6. Inclusión de pequeños productores; 7. Gobernanza de datos y, 8. Barreras institucionales y territoriales.

La distribución geográfica de las publicaciones se examinó de manera descriptiva. Cada documento se contabilizó una sola vez. Cuando las afiliaciones de los autores correspondían a distintas regiones, el documento se clasificó como interregional. Esta clasificación describe únicamente el corpus seleccionado y no representa la producción científica mundial sobre Agricultura 5.0.

Mapa conceptual exploratorio. Como complemento de la síntesis temática, se elaboró un mapa exploratorio de relaciones conceptuales mediante el software VOSviewer. Antes de construir la red, se normalizaron términos equivalentes y se agruparon las categorías relacionadas con tecnologías, aplicaciones, impactos, capital humano y condiciones de adopción.

El mapa se construyó a partir de los términos y categorías extraídos de los 14 documentos del corpus analítico principal. Debido a que no se utilizaron exportaciones bibliográficas completas de Scopus o Web of Science, la figura no se interpreta como un análisis bibliométrico convencional. VOSviewer se empleó como herramienta de visualización exploratoria de las relaciones conceptuales identificadas en la síntesis temática. Por esta razón, el tamaño de los nodos, la proximidad entre términos y la fuerza de los enlaces representan relaciones conceptuales dentro del corpus estudiado y no frecuencias bibliométricas de la producción científica mundial.

RESULTADOS

Composición del corpus documental.

El conjunto documental examinado estuvo compuesto por 29 documentos. De ellos, 27 fueron incluidos en la revisión y dos fueron excluidos por no presentar relación directa con la Agricultura 5.0, la Industria 5.0 o los sistemas agrícolas. Los 27 documentos incluidos se organizaron en un corpus analítico principal y un corpus complementario. El corpus analítico principal estuvo integrado por 14 documentos relacionados directamente con las tecnologías de la Agricultura 5.0, la innovación tecnológica, la sostenibilidad, el capital humano y las condiciones de adopción. El corpus complementario estuvo constituido por nueve documentos teóricos, tres documentos institucionales y una referencia metodológica (Tabla 1).

Tabla 1. Composición del corpus documental.

Categoría documental	Número	Porcentaje	Función en el artículo
Corpus analítico principal	14	51.90	Sustenta el análisis de tecnologías, aplicaciones, sostenibilidad, capital humano y adopción.
Referencias teóricas complementarias	9	33.30	Apoyan la fundamentación conceptual y la discusión
Documentos institucionales	3	11.10	Definen los principios de centralidad humana, sostenibilidad y resiliencia
Referencia metodológica	1	3.70	Sustenta el reporte conforme a PRISMA 2020
Total de documentos incluidos	**27**	**100**	

Nota: Los porcentajes se calcularon sobre los 27 documentos incluidos. Los dos documentos excluidos representan el 6,9 % del conjunto documental examinado de 29 documentos.

Suelos Ecuatoriales 55 (1 y 2): 36-51. https://doi.org/10.47864/se552025p3651

El corpus analítico principal representó el 51,9 % de los documentos incluidos. Esto indica que una proporción importante de la argumentación conceptual se apoyó en referencias complementarias, institucionales o metodológicas. Por tanto, los resultados derivados directamente de estudios sobre Agricultura 5.0 deben diferenciarse de los conceptos provenientes de literatura general sobre Industria 5.0, capital humano y sostenibilidad.

Distribución regional del corpus analítico.

La distribución regional se analizó sobre los 14 documentos del corpus analítico principal. La clasificación se realizó según la región de afiliación institucional de los autores. Cuando un documento incluyó instituciones pertenecientes a más de una región, se clasificó como interregional (Tabla 2).

Tabla 2. Distribución regional de las afiliaciones institucionales del corpus analítico.

Región de afiliación institucional	Cantidad de publicaciones	%	Temas centrales
Asia	5	35.70	Inteligencia artificial, Internet de las cosas, agricultura inteligente y producción sostenible.
Europa	3	21.40	Competencias digitales, centralidad humana y colaboración humano-máquina.
África	2	14.30	Pequeños productores, brecha digital e inclusión tecnológica.
Afiliaciones interregionales	4	28.60	Agricultura de precisión, automatización, robótica, redes 6G y cooperación científica.
Total	**14**	**100**	

Nota: La distribución corresponde a las afiliaciones institucionales de los documentos seleccionados y no representa la ubicación mundial de la investigación sobre Agricultura 5.0 ni la totalidad de la literatura disponible.

Asia constituyó la categoría individual con mayor representación, con cinco documentos, equivalentes al 35,7 % del corpus analítico. Europa aportó tres documentos y África dos. Los estudios con afiliaciones interregionales representaron el 28,6 %, lo que evidencia la presencia de colaboraciones académicas entre instituciones de diferentes regiones. Sin embargo, estos datos no permiten afirmar que Asia domine la producción científica mundial ni que todas las redes interregionales conecten simultáneamente Asia, Europa, África y América Latina. La presencia latinoamericana fue limitada y se identificó principalmente en estudios de colaboración internacional, incluido un trabajo relacionado con Colombia. Asimismo, los resultados correspondientes a África deben interpretarse como tendencias del corpus seleccionado y no como características generales de la investigación africana.

Tecnologías y aplicaciones identificadas. Los 14 documentos del corpus analítico describieron diversas tecnologías asociadas con la Agricultura 5.0. Entre ellas se identificaron el Internet de las cosas, la inteligencia artificial, los gemelos digitales, la robótica, los drones, blockchain, el análisis de grandes volúmenes de datos, la computación en la nube, la realidad extendida y las comunicaciones 6G.

La Tabla 3 presenta una síntesis temática de sus aplicaciones, contribuciones potenciales y limitaciones. La tabla no establece una clasificación de eficacia ni permite afirmar qué tecnología es predominante, porque no se calculó el número de documentos que mencionó cada tecnología. En conjunto, los documentos relacionaron las tecnologías digitales con cuatro funciones principales: monitoreo, predicción, automatización y apoyo a la toma de decisiones. Sin embargo, también señalaron que su implementación depende de condiciones habilitantes como conectividad, financiación, soporte técnico, competencias digitales, interoperabilidad y gobernanza de datos.

Tabla 3. Tecnologías y aplicaciones asociadas con la Agricultura 5.0

Tecnología	Aplicaciones agrícolas y edáficas descritas	Contribuciones potenciales	Limitaciones identificadas
Internet de las cosas	Monitoreo de humedad, temperatura, variables del suelo, cultivos y animales.	Captura de datos en tiempo real y apoyo al uso eficiente de recursos	Conectividad insuficiente, falta de interoperabilidad y costos de implementación
Inteligencia artificial	Predicción de rendimientos, plagas, enfermedades y necesidades de riego.	Apoyo a la predicción de riesgos y a la toma de decisiones.	Sesgos, baja explicabilidad y dependencia de la calidad de los datos.
Gemelos digitales	Simulación de cultivos, suelos, maquinaria y escenarios climáticos.	Evaluación virtual de alternativas y reducción de riesgos.	Complejidad técnica y necesidad de datos confiables.
Robótica y drones	Siembra, monitoreo, aplicación de insumos, cosecha y control de malezas.	Automatización de tareas repetitivas o peligrosas y aplicación localizada.	Inversión inicial, mantenimiento, regulación y posible transformación del empleo.
Blockchain	Trazabilidad de productos, transacciones y verificación de origen.	Mayor transparencia y confianza en las cadenas agroalimentarias.	Problemas de escalabilidad, consumo energético y regulación.
Big data y computación en la nube	Integración y análisis de datos provenientes de sensores, satélites, clima y unidades productivas.	Identificación de patrones y apoyo a decisiones complejas.	Propiedad, privacidad, concentración y seguridad de los datos.
Realidad extendida y comunicaciones 6G	Capacitación, asistencia remota e interacción con maquinaria.	Formación inmersiva, comunicación de baja latencia y colaboración a distancia.	Costos, cobertura, infraestructura y necesidad de nuevas competencias.

Nota: Elaboración propia a partir de la matriz de análisis documental. Las contribuciones se presentan como posibilidades descritas en la literatura y no como efectos comprobados en todos los sistemas agrícolas.

Suelos Ecuatoriales 55 (1 y 2): 36-51. https://doi.org/10.47864/se552025p3651

Relaciones conceptuales del corpus. La Figura 1 presenta una representación descriptiva de la composición del corpus y de sus principales categorías. Debido a que se construyó a partir de la clasificación documental, debe interpretarse como un recurso de organización visual y no como una medición bibliométrica.

La Figura 2 presenta el mapa exploratorio de relaciones conceptuales elaborado con VOSviewer a partir de los términos y categorías extraídos de los 14 documentos del corpus analítico. La representación muestra asociaciones entre Industria 5.0, Agricultura 5.0, inteligencia artificial, Internet de las cosas, robótica, automatización, gemelos digitales, productividad, sostenibilidad, resiliencia, capital humano y competencias digitales.

La posición central de las categorías Industria 5.0 y Agricultura 5.0 debe interpretarse con cautela, porque ambas fueron utilizadas como categorías organizadoras de la revisión. Por ello, su proximidad con otras categorías representa relaciones identificadas en la matriz de análisis, pero no demuestra causalidad ni superioridad científica.

La red conceptual sugiere que la transición hacia la Agricultura 5.0 se presenta en la literatura como un proceso condicionado por la interacción entre tecnología, conocimiento agronómico, capacidades humanas y contextos institucionales. Los documentos también relacionan la adopción tecnológica con la conectividad rural, la formación, la gobernanza de datos, la inclusión de pequeños productores y la protección ambiental.

En relación con el suelo, el corpus vincula algunas tecnologías con el monitoreo de humedad, temperatura, nutrientes y variabilidad espacial. No obstante, la evidencia edáfica no fue cuantificada de manera independiente. Por tanto, los resultados permiten identificar una conexión conceptual entre Agricultura 5.0 y manejo del suelo, pero no permiten estimar sus efectos sobre calidad, fertilidad, carbono orgánico, erosión o productividad del suelo.

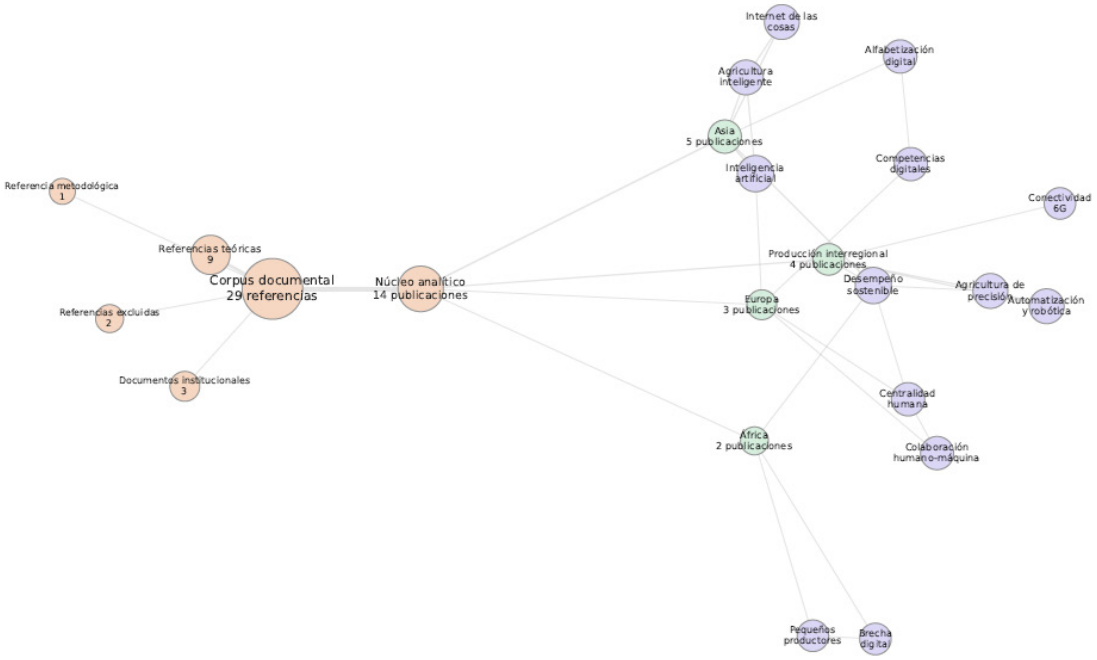


Figura 1. Diagrama del proceso de selección documental conforme a PRISMA 2020

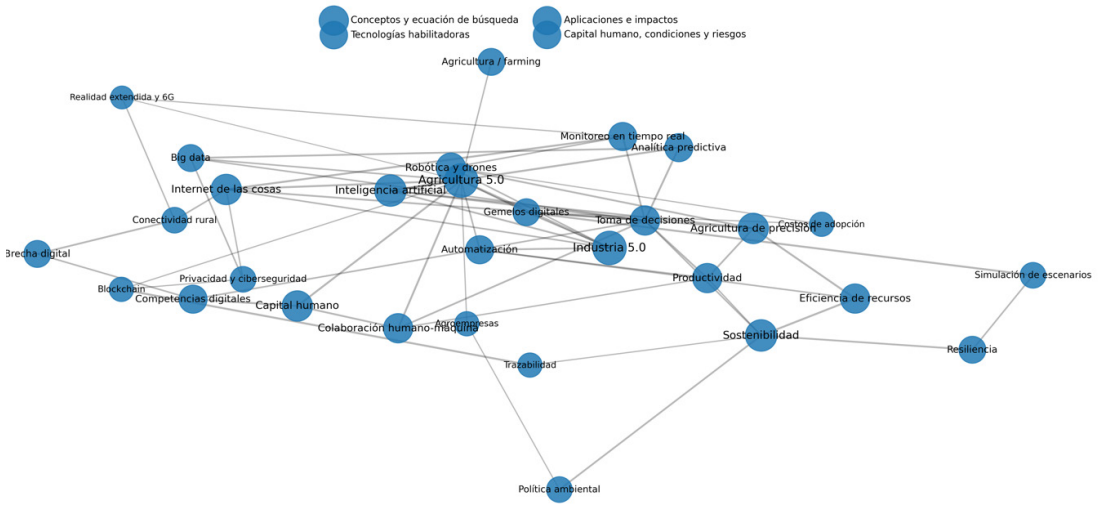


Figura 2. Mapa exploratorio de relaciones conceptuales sobre Industria 5.0 y Agricultura 5.0

DISCUSIÓN

Tecnologías digitales, toma de decisiones y manejo del suelo. El corpus analizado describe la Agricultura 5.0 como una integración de sensores, Internet de las cosas, inteligencia artificial, gemelos digitales, robótica, drones y análisis de datos. Estas tecnologías se presentan como herramientas para mejorar el monitoreo de los sistemas productivos, anticipar riesgos y apoyar la toma de decisiones (Sharma et al. 2024; Taha et al. 2025).

El Internet de las cosas permite recopilar información sobre variables ambientales, cultivos, animales y condiciones del suelo. Esta información puede alimentar modelos de inteligencia artificial para identificar patrones y apoyar decisiones relacionadas con el riego, la fertilización, el control de enfermedades y la planificación de labores. Los gemelos digitales, por su parte, permiten representar parcelas, cultivos, maquinaria y escenarios productivos para evaluar alternativas antes de aplicarlas en campo (Böğrekçi & Demircioğlu 2025). Sin embargo, la disponibilidad de datos no garantiza decisiones adecuadas. La utilidad de estas tecnologías depende de la calidad de los datos, la calibración de los sensores, la validación de los modelos y la supervisión agronómica. En el caso del suelo, las herramientas digitales pueden apoyar el monitoreo de humedad, temperatura, nutrientes y variabilidad espacial, pero la revisión no aporta evidencia suficiente para afirmar que su uso mejore directamente la fertilidad, el carbono orgánico, la estructura, la erosión o la salud del suelo.

Eficiencia y colaboración entre personas y máquinas. La literatura revisada relaciona la Agricultura 5.0 con una mayor precisión en el uso del agua, los fertilizantes y los productos fitosanitarios. No obstante, estos beneficios deben interpretarse como contribuciones potenciales y no como efectos garantizados, debido a que dependen de las condiciones técnicas, económicas y territoriales de cada sistema productivo.

Demircioğlu et al. (2024) plantean la autonomación como la integración de procesos automatizados con sistemas de supervisión capaces de detectar anomalías y solicitar la intervención humana. Este enfoque resulta especialmente pertinente en la agricultura, donde las condiciones climáticas, biológicas y edáficas cambian constantemente.

Suelos Ecuatoriales 55 (1 y 2): 36-51. https://doi.org/10.47864/se552025p3651

La automatización puede apoyar tareas repetitivas, peligrosas o de alta precisión, pero no elimina la necesidad de conocimiento agronómico ni de decisiones contextualizadas. Por tanto, la relación entre personas y máquinas debe orientarse a complementar capacidades. La tecnología puede procesar grandes volúmenes de información y ejecutar operaciones repetitivas, mientras que los productores y técnicos interpretan los resultados, reconocen situaciones no previstas y ajustan las recomendaciones a las condiciones reales del terreno.

Sostenibilidad, grupos de interés y gobernanza. La sostenibilidad de la Agricultura 5.0 no puede evaluarse únicamente mediante productividad o reducción de insumos. Guo et al. (2023) plantean que el desempeño de las empresas agrarias debe considerar simultáneamente dimensiones económicas, ambientales y sociales, así como las expectativas de trabajadores, comunidades, consumidores, gobiernos y otros grupos de interés.

En la misma línea, Zhang (2024) señala que la innovación tecnológica puede contribuir a la eficiencia y a la gestión ambiental cuando está acompañada por políticas, incentivos y normas coherentes. Sin embargo, la adopción tecnológica también implica costos de inversión, mantenimiento, dependencia de proveedores, transformación del empleo, concentración de datos y posibles desigualdades en la distribución de beneficios. En consecuencia, una tecnología puede ser eficiente desde el punto de vista productivo y, al mismo tiempo, generar efectos sociales o territoriales negativos. La sostenibilidad requiere considerar quién controla los datos, quién puede acceder a las herramientas, quién asume los costos y quién recibe los beneficios. Esta perspectiva es especialmente relevante para los pequeños productores y para las comunidades rurales con limitaciones de conectividad, financiación y asistencia técnica.

Capital humano e inclusión rural. La revisión muestra que el capital humano funciona como una condición habilitante de la Agricultura 5.0. Los datos generados por sensores, plataformas y algoritmos deben ser interpretados y convertidos en decisiones productivas. Por ello, la alfabetización digital debe complementarse con conocimientos agronómicos, pensamiento crítico, capacidad analítica y comprensión de los riesgos asociados con la automatización y la gestión de datos.

Holzinger et al. (2024) proponen una inteligencia artificial centrada en las personas, en la cual el agricultor participa en la interpretación de los resultados, identifica posibles errores y aporta conocimiento contextual. Esta perspectiva es relevante para el manejo del suelo, porque las recomendaciones digitales deben contrastarse con la observación directa del terreno y con la experiencia acumulada por los productores.

Liu et al. (2024) relacionan la alfabetización digital con prácticas de producción ambientalmente responsables. Sus resultados sugieren que la capacitación no debe limitarse al uso instrumental de dispositivos, sino que debe fortalecer la comprensión de los procesos productivos y ambientales. De manera complementaria, Gumbi et al. (2023) identifican la conectividad, la infraestructura, los costos, la asesoría y el acceso a los mercados como condiciones importantes para la adopción de tecnologías digitales por parte de pequeños productores. Por ello, la inclusión requiere programas de formación continua, servicios de extensión, soluciones de bajo costo, plataformas adaptadas a conectividad limitada y modelos de acceso colectivo mediante cooperativas, asociaciones y organizaciones rurales.

Implicaciones para la ciencia del suelo. Desde la perspectiva de la ciencia del suelo, la Agricultura 5.0 ofrece herramientas para mejorar el monitoreo espacial y temporal de las condiciones edáficas y para apoyar decisiones de manejo localizado. Sin embargo, el corpus analizado aborda el suelo principalmente como una fuente de datos o como parte del sistema productivo, y no como un resultado central de evaluación.

La evidencia disponible no permite concluir que la Agricultura 5.0 mejore por sí misma la calidad, fertilidad, estructura o salud del suelo. Para establecer estos efectos se requieren estudios de campo, diseños comparativos y evaluaciones longitudinales que midan variables como carbono orgánico, estabilidad estructural, disponibilidad de nutrientes, infiltración, erosión, salinidad y eficiencia en el uso del agua. Esta limitación debe reconocerse claramente para evitar que el artículo atribuya a las tecnologías beneficios edáficos que todavía no han sido demostrados de forma suficiente.

Implicaciones institucionales y agenda de investigación. La adopción sostenible de la Agricultura 5.0 requiere instituciones capaces de regular la protección de datos, la interoperabilidad, la ciberseguridad y la distribución de beneficios. También es necesario desarrollar políticas que apoyen la conectividad rural, la financiación, la formación y el acceso de pequeños productores a servicios tecnológicos compartidos.

Las investigaciones futuras deberían evaluar, mediante estudios empíricos y longitudinales, los efectos productivos, ambientales, laborales y económicos de estas tecnologías. También deberían analizar la propiedad de los datos agrícolas, el consentimiento, la privacidad, la dependencia tecnológica y la participación de los productores en el diseño de las soluciones.

CONCLUSIONES

La revisión exploratoria muestra que la Agricultura 5.0 no debe entenderse como la simple incorporación de inteligencia artificial, Internet de las cosas, robótica, drones, gemelos digitales, blockchain y análisis de datos. Su principal diferencia consiste en articular estas tecnologías con la centralidad humana, la sostenibilidad y la resiliencia propias del enfoque de Industria 5.0.

Las tecnologías revisadas pueden apoyar el monitoreo de cultivos, recursos y variables del suelo, así como la predicción de riesgos y la toma de decisiones agrícolas. No obstante, sus beneficios son potenciales y dependen de la calidad de los datos, la conectividad, la financiación, el soporte técnico, la validación agronómica y las condiciones institucionales. El capital humano constituye una condición fundamental para que la transformación tecnológica produzca resultados pertinentes. Las competencias digitales deben integrarse con conocimientos agronómicos, capacidad analítica, pensamiento crítico, criterios éticos y habilidades para trabajar con sistemas automatizados. La extensión agropecuaria, la formación continua y el fortalecimiento de las organizaciones rurales son necesarios para favorecer la inclusión de los pequeños productores.

La revisión también evidencia riesgos relacionados con la brecha digital, la dependencia tecnológica, la concentración de datos, la ciberseguridad, la transformación del empleo y la desigual distribución de beneficios. Por ello, la regulación debe promover la protección de datos, la interoperabilidad, la transparencia, la participación de los productores y el acceso equitativo a las tecnologías.

En relación con el suelo, la Agricultura 5.0 puede contribuir al monitoreo y al manejo

Suelos Ecuatoriales 55 (1 y 2): 36-51. https://doi.org/10.47864/se552025p3651

localizado de agua, nutrientes y otras variables edáficas. Sin embargo, el corpus analizado no ofrece evidencia suficiente para demostrar mejoras directas en la salud, fertilidad, estructura o conservación del suelo. Esta constituye una de las principales limitaciones del estudio y una prioridad para futuras investigaciones.

Entre las limitaciones de la revisión se encuentran el carácter exploratorio y descriptivo del análisis, el tamaño reducido del corpus analítico, compuesto por 14 documentos, la heterogeneidad de las fuentes y la ausencia de exportaciones bibliográficas completas de Scopus o Web of Science. También fue limitada la evidencia empírica y longitudinal sobre rentabilidad, empleo, adopción tecnológica y resultados edáficos.

En síntesis, la Agricultura 5.0 puede contribuir a sistemas agrícolas más productivos, sostenibles y resilientes cuando la innovación tecnológica se articula con el capital humano, el conocimiento agronómico, la gobernanza institucional y la inclusión de los pequeños productores. La tecnología, por sí sola, no garantiza estos resultados.

REFERENCIAS

Bálint, L. P., Botos, S., & Várallyai, L. (2024). Towards Agriculture 5.0 in the European Union: Training and digital skill trends in the agricultural sector. *CEUR Workshop Proceedings, 3930*, 46–50. https://ceur-ws.org/Vol-3930/paper8.pdf

Barrios-Ulloa, A., Solano-Barliza, A., Arrubla-Hoyos, W., Ojeda-Beltrán, A., Cama-Pinto, D., Arrabal-Campos, F. M., & Cama-Pinto, A. (2025). Agriculture 5.0 in Colombia: Opportunities through the emerging 6G network. *Sustainability, 17*(15), Article 6664. https://doi.org/10.3390/su17156664

Böğrekçi, I., & Demircioğlu, P. (2025). Advancements in Industry-Agriculture 5.0: Utilizing unmanned ground and aerial vehicles for sustainable precision agriculture. *Journal of Automation, Mobile Robotics and Intelligent Systems, 19*(4), 35–51. https://doi.org/10.14313/jamris-2025-034

Breque, M., De Nul, L., & Petridis, A. (2021). *Industry 5.0: Towards a sustainable, human-centric and resilient European industry* (Report No. KI-BD-20-021-EN-N). Directorate-General for Research and Innovation, European Commission. https://doi.org/10.2777/308407

Demircioğlu, P., Böğrekçi, I., Durakbaşa, M. N., & Bauer, J. (2024). Autonomation, automation, AI, and Industry-Agriculture 5.0 in sustainable agro-ecological food production. In N. M. Durakbaşa & M. G. Gençyılmaz (Eds.), *Industrial engineering in the Industry 4.0 era* (pp. 545–556). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-031-53991-6_42

European Commission. (2021, January 7). *Industry 5.0: Towards more sustainable, resilient and human-centric industry*. https://research-and-innovation.ec.europa.eu/news/all-research-and-innovation-news/industry-50-towards-more-sustainable-resilient-and-human-centric-industrial-model-2021-01-07_en

European Commission. (2025). *Industry 5.0: Research and innovation*. https://research-and-innovation.ec.europa.eu/research-area/industrial-research-and-innovation/industry-50_en

Fountas, S., Espejo-García, B., Kasimati, A., Gemtou, M., Panoutsopoulos, H., & Anastasiou, E. (2024). Agriculture 5.0: Cutting-edge technologies, trends, and challenges. *IT Professional, 26*(1), 40–47. https://doi.org/10.1109/MITP.2024.3358972

Gamberini, L., & Pluchino, P. (2024). Industry 5.0: A comprehensive insight into the future of work, social sustainability, sustainable development, and career. *Australian Journal of Career Development, 33*(1), 5–14. https://doi.org/10.1177/10384162241231118

Gumbi, N., Gumbi, L., & Twinomurinzi, H. (2023). Towards sustainable digital agriculture for smallholder farmers: A systematic literature review. *Sustainability, 15*(16), Article 12530. https://doi.org/10.3390/su151612530

Guo, L., Sun, D., Warraich, M. A., & Waheed, A. (2023). Does Industry 5.0 model optimize sustainable performance of agri-enterprises? Real-time investigation from the realm of stakeholder theory and domain. *Sustainable Development, 31*(4), 2507–2516. https://doi.org/10.1002/sd.2527

Haloui, D., Oufaska, K., Oudani, M., & El Yassini, K. (2024). Bridging Industry 5.0 and Agriculture 5.0: Historical perspectives, opportunities, and future perspectives. *Sustainability, 16*(9), Article 3507. https://doi.org/10.3390/su16093507

Holzinger, A., Fister, I., Jr., Fister, I., Kaul, H.-P., & Asseng, S. (2024). Human-centered AI in smart farming: Toward Agriculture 5.0. *IEEE Access, 12*, 62199–62214. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3395532

Huma, S., Muslim, S., & Ahmed, W. (2024). Understanding the role of organizational intellectual capital on developing absorptive capacity to strategize innovation ambidexterity. *Review of International Business and Strategy, 34*(3), 433–453. https://doi.org/10.1108/RIBS-08-2023-0088

Liu, X., Wang, Z., & Han, X. (2024). The impact of digital literacy on farmers' green production behavior: Mediating effects based on ecological cognition. *Sustainability, 16*(17), Article 7507. https://doi.org/10.3390/su16177507

Narkhede, G., Pasi, B., Rajhans, N., & Kulkarni, A. (2023). Industry 5.0 and the future of sustainable manufacturing: A systematic literature review. *Business Strategy & Development, 6*(4), 704–723. https://doi.org/10.1002/bsd2.272

Ospina Nieto, Y. (Ed.). (2025). *Industria 5.0 y capital humano: Innovación, competencias y desafíos éticos en la transformación organizacional*. Editorial Universidad Santiago de Cali. https://doi.org/10.35985/9786287770911

Page, M. J., McKenzie, J. E., Bossuyt, P. M., Boutron, I., Hoffmann, T. C., Mulrow, C. D., Shamseer, L., Tetzlaff, J. M., Akl, E. A., Brennan, S. E., Chou, R., Glanville, J., Grimshaw, J. M., Hróbjartsson, A., Lalu, M. M., Li, T., Loder, E. W., Mayo-Wilson, E., McDonald, S., … Moher, D. (2021). The PRISMA 2020 statement: An updated guideline for reporting systematic reviews. *BMJ, 372*, Article n71. https://doi.org/10.1136/bmj.n71

Parashar, S., Raj, S., Srivastava, P., & Singh, A. K. (2024). Comparative toxicity assessment of selected nanoparticles using different experimental model organisms. *Journal of Pharmacological and Toxicological Methods, 130*, Article 107563. https://doi.org/10.1016/j.vascn.2024.107563

Rame, R., Purwanto, P., & Sudarno, S. (2024). Industry 5.0 and sustainability: An overview of emerging trends and challenges for a green future. *Innovation and Green Development, 3*(4), Article 100173. https://doi.org/10.1016/j.igd.2024.100173

Rani, R., Sri, N. S., Medishetti, R., Chatti, K., & Sevilimedu, A. (2024). Loss of FMRP affects ovarian development and behaviour through multiple pathways in a zebrafish model of fragile X syndrome. *Human Molecular Genetics, 33*(16), 1391–1405. https://doi.org/10.1093/hmg/ddae077

Razak, S. F. A., Yogarayan, S., Sayeed, M. S., & Mohd Derafi, M. I. F. (2024). Agriculture 5.0 and explainable AI for smart agriculture: A scoping review. *Emerging Science Journal, 8*(2), 744–760. https://doi.org/10.28991/ESJ-2024-08-02-02

Rivera Méndez, Y. D., & Romero Angulo, H. M. (2021). Cenipalma 30 años: El Centro de Investigación es motor en la construcción y fortalecimiento de capital humano para Colombia. *El Palmicultor*. https://publicaciones.fedepalma.org/index.php/palmicultor/article/view/13622

Sardana, D., Dhaigude, A., & Gupta, N. (2023). What mediate cognitive capital and organization projects performance in international partner projects. In *Academy of Management Proceedings* (Vol. 2023, No. 1, Article 16413). Academy of Management. https://doi.org/10.5465/AMPROC.2023.16413abstract

Sharma, A., Singh, S. K., Kumar, S., Thakur, R., Gupta, B. B., & Arya, V. (2024). IoT-enabled smart farming with Industry 5.0. *Journal of High Speed Networks, 30*(3), 477–496. https://doi.org/10.3233/JHS-230258

Szara, K. (2025). Resilience in Industry 5.0: Systematic literature review. *Zeszyty Naukowe. Organizacja i Zarządzanie, 224*, 523–550. https://openurl.ebsco.com/EPDB%3Agcd%3A4%3A2593300/o%3Aplink%3Ascholar&id=ebsco%3Agcd%3A186514696&crl=c&link_origin=scholar.google.com

Taha, M. F., Mao, H., Zhang, Z., Elmasry, G., Awad, M. A., Abdalla, A., Mousa, S., Elwakeel, A. E., & Elsherbiny, O. (2025). Emerging technologies for precision crop management towards Agriculture 5.0: A comprehensive overview. *Agriculture, 15*(6), Article 582. https://doi.org/10.3390/agriculture15060582

Valyan, A., Farsi, S., & Sherafati, N. (2024). *Analyzing the relationship between cognitive capital skills and performance metrics of call center employees: An exploratory study* [Preprint]. Preprints.org. https://www.preprints.org/frontend/script/613f4655be76a9f6851d126a1979828b/download_pub

Zhang, Y. (2024). A path to sustainable development of agri-industries: Analysis of Agriculture 5.0 versus Industry 5.0 using stakeholder theory with moderation of environmental policy. *Sustainable Development, 32*(5), 4829–4843. https://doi.org/10.1002/sd.2923

SUELOS ECUATORIALES

Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo

https://doi.org/10.47864/se552025p5275

Predicción de propiedades del suelo mediante espectroscopía Vis-NIR-MIR: avances recientes, oportunidades y desafíos

Prediction of Soil Properties Using Vis–NIR–MIR Spectroscopy: Recent Advances, Opportunities, and Challenges

Jhony Armando Benavides-Bolaños[1*]✉, Oscar Eduardo Trujillo-Obando[2]✉, Elizabeth Patricia Rosero-Cuastumal[3]✉

[1*] Universidad del Valle, Escuela de Ingeniería de los Recursos Naturales y del Ambiente (EIDENAR), Cali, Colombia.
[2] Universidad Nacional Abierta y a Distancia (UNAD), Escuela de Ciencias Agrícolas, Pecuarias y del Medio Ambiente, Grupo de Investigación Iniciativa Territorial, Palmira, Colombia.
[3] UNINTEP (Institución Universitaria de Roldanillo) sede Florida (Valle del Cauca), Colombia. (Unidad de Ciencias Ambientales y Agropecuarias).

Vol. 55 (1 y 2) de 2025 | pp: 52-75 | ISSN 0562-5351 E-ISSN 2665-6558 | REC.: 05/08/2026 - ACEP.: 28/08/2026

RESUMEN

La espectroscopía de reflectancia permite estimar múltiples propiedades edáficas de forma rápida, no destructiva y con escaso consumo de reactivos, pero su desempeño varía entre propiedades y condiciones de aplicación. Esta revisión narrativa enfocada sintetiza avances recientes en las regiones visible, infrarrojo cercano e infrarrojo medio, identifica las propiedades y estrategias metodológicas con mayor respaldo y examina las condiciones necesarias para convertir calibraciones experimentales en herramientas operativas, con énfasis en suelos tropicales y sistemas agrícolas latinoamericanos. La evidencia es más consistente para carbono y materia orgánica, textura, mineralogía, nitrógeno total y pH; en cambio, nutrientes disponibles, salinidad e indicadores biológicos presentan resultados más variables debido a sus relaciones espectrales predominantemente indirectas. Ningún algoritmo resulta universalmente superior: la calidad de los análisis de referencia, la preparación de las muestras, el preprocesamiento, la representatividad de las bibliotecas y el diseño de validación condicionan tanto o más la precisión. La transferencia entre regiones, profundidades, instrumentos y estados de humedad continúa siendo la principal limitación operativa. Se concluye que la implementación debe basarse en validación externa, delimitación del dominio, estimación de incertidumbre y actualización con muestras locales. Para Colombia, se propone una adopción gradual mediante bibliotecas regionales, protocolos armonizados y sistemas híbridos que integren mediciones espectrales y análisis convencionales.

Palabras clave: Aprendizaje automático; datos espectrales; modelo espectroscópico; percepción remota proximal; predicción de propiedades del suelo.

ABSTRACT

Reflectance spectroscopy enables rapid, nondestructive estimation of multiple soil attributes with minimal reagent consumption, but its performance varies among attributes and application conditions. This focused narrative review synthesizes recent advances across the visible, near-infrared, and mid-infrared regions, identifies the best-supported attributes and methodological strategies, and examines the conditions required to convert experimental calibrations into operational tools, emphasizing tropical soils and Latin American agricultural systems. Evidence is most consistent for carbon and organic matter, texture, mineralogy, total nitrogen, and pH; conversely, available nutrients, salinity, and biological indicators show more variable results because their spectral relationships are predominantly indirect. No algorithm is universally superior: the quality of reference analyses, sample preparation, preprocessing, library representativeness, and validation design influence accuracy as much as or more than model complexity.

Transfer across regions, depths, instruments, and moisture conditions remains the main operational limitation. Implementation should therefore rely on external validation, domain delimitation, uncertainty estimation, and updating with local samples. For Colombia, gradual adoption is proposed through regional libraries, harmonized protocols, and hybrid systems combining spectral measurements with conventional analyses. This approach preserves laboratory methods for calibration and quality control while exploiting spectroscopy to increase sampling density, shorten turnaround times, and support agronomic decisions when predictive uncertainty remains acceptable.

Keywords: Machine learning; proximal remote sensing; soil properties prediction; spectral data; spectroscopic model.

INTRODUCCIÓN

La caracterización de las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo es fundamental para evaluar su fertilidad, orientar el manejo agrícola y monitorear procesos como la degradación y el almacenamiento de carbono. Los métodos convencionales de laboratorio proporcionan mediciones de referencia con alta especificidad analítica, pero requieren tiempo, reactivos, preparación de muestras y recursos económicos que pueden limitar la cantidad de observaciones disponibles. Esta restricción adquiere especial importancia cuando se necesita representar la variabilidad espacial y temporal del suelo mediante numerosos análisis.

La espectroscopía de reflectancia constituye una alternativa complementaria para generar información edáfica de manera rápida, no destructiva y con un consumo mínimo de reactivos. La técnica registra la interacción de la radiación electromagnética con los componentes orgánicos y minerales del suelo en las regiones visible (Vis), infrarrojo cercano (NIR) e infrarrojo medio (MIR). Los espectros obtenidos contienen información relacionada con enlaces químicos, grupos funcionales, minerales, materia orgánica y agua, que puede extraerse mediante calibración multivariada y métodos de aprendizaje automático. Aunque una estimación espectroscópica individual suele ser menos precisa que una determinación convencional, su menor costo permite analizar más muestras y representar mejor la heterogeneidad del suelo (Viscarra Rossel et al., 2022).

El potencial predictivo varía considerablemente entre propiedades. El carbono y la materia orgánica, la textura, el nitrógeno total, el pH y algunos componentes mineralógicos presentan la evidencia más consolidada. Otras variables, como nutrientes disponibles, elementos traza y propiedades biológicas, generalmente se estiman de manera indirecta mediante su covariación con componentes espectralmente activos. En una revisión de 305 publicaciones, MIR mostró, en promedio, un desempeño superior para varias propiedades, especialmente arena, arcilla, carbono, nitrógeno y capacidad de intercambio catiónico. Sin embargo, la precisión también estuvo condicionada por la profundidad, el tipo de suelo, el instrumento, el intervalo espectral, el método analítico de referencia, el preprocesamiento y el modelo de calibración (Gozukara et al., 2025).

La modelación espectral ha evolucionado desde métodos quimiométricos, como la regresión por mínimos cuadrados parciales, hacia bosques aleatorios, Cubist, máquinas de vectores de soporte, aprendizaje basado en memoria y redes neuronales. No obstante, un modelo complejo no garantiza predicciones más confiables. Las asociaciones identificadas pueden depender de la composición particular de la biblioteca espectral, incluir relaciones fortuitas o carecer de una explicación edáfica plausible. Por esta razón, la calidad de los datos, la representatividad del conjunto de calibración y la incorporación de conocimiento del suelo pueden ser más importantes que la selección de un algoritmo aparentemente superior (Ma et al., 2023).

Las bibliotecas espectrales han ampliado la posibilidad de desarrollar modelos regionales, nacionales y globales, pero también han expuesto dificultades relacionadas con la heterogeneidad de las muestras y la compatibilidad entre instrumentos. La transferencia de calibraciones puede reducir diferencias sistemáticas entre espectrómetros, aunque su conveniencia debe evaluarse para cada propiedad y configuración instrumental. Algunos estudios han obtenido predicciones satisfactorias con transformaciones relativamente simples, mientras que otros muestran que las funciones de transferencia no mejoran consistentemente los modelos y pueden requerir muestras representativas analizadas en ambos equipos (Sanderman et al., 2023; Ng et al., 2024).

Aunque la literatura reciente muestra avances importantes en precisión predictiva, persiste una separación entre el desempeño obtenido bajo condiciones controladas y la capacidad de transferir los modelos entre suelos, regiones, profundidades, instrumentos y condiciones de humedad. Esta revisión narrativa enfocada sintetiza los avances recientes en la predicción de propiedades del suelo mediante espectroscopía Vis–NIR–MIR, identifica las propiedades y estrategias metodológicas con mayor respaldo y analiza las condiciones necesarias para convertir modelos experimentales en herramientas reproducibles y operativas, con especial atención a los suelos tropicales y los sistemas agrícolas latinoamericanos.

METODOLOGÍA

Se realizó una revisión narrativa enfocada y actualizada de literatura científica sobre la predicción de propiedades del suelo mediante espectroscopía Vis–NIR–MIR. Se priorizaron artículos originales y revisiones recientes publicados en revistas arbitradas, complementados con trabajos anteriores que aportaran fundamentos conceptuales o metodológicos indispensables. La literatura se organizó según las propiedades estudiadas, las regiones espectrales, los métodos de preprocesamiento y modelación, el uso de bibliotecas espectrales y las estrategias de validación y transferencia.

Se seleccionaron preferentemente estudios que presentaran predicciones cuantitativas, comparaciones metodológicas, validación independiente, transferencia entre instrumentos o regiones y aplicaciones emergentes. Se excluyeron trabajos alejados de la estimación de propiedades edáficas, documentos con información metodológica insuficiente y publicaciones redundantes. Debido al carácter narrativo de la revisión, la evidencia se sintetizó por tendencias y decisiones metodológicas, sin comparar directamente métricas obtenidas con poblaciones, intervalos de concentración o diseños de validación diferentes.

Del espectro a la predicción de propiedades del suelo

La espectroscopía de reflectancia registra la interacción de la radiación con componentes orgánicos, minerales y acuosos. La región visible (400–700 nm) responde principalmente al color, la materia orgánica y los óxidos de hierro, mientras Vis–NIR–SWIR (700–2500 nm) registra sobretonos y combinaciones de enlaces O–H, C–H, N–H y C–O (Soriano-Disla et al., 2014; Viscarra Rossel et al., 2022). En MIR (2500–20 000 nm), las vibraciones fundamentales son más intensas y específicas; por ello, esta región suele diferenciar mejor componentes químicos y mineralógicos, mientras Vis–NIR ofrece mayor portabilidad para mediciones proximales (Swan et al., 2026; Gozukara et al., 2025).

La relación espectral puede ser directa, como en carbono orgánico, carbonatos, agua y algunos minerales, o indirecta, como en pH, capacidad de intercambio catiónico, nutrientes disponibles e indicadores biológicos.

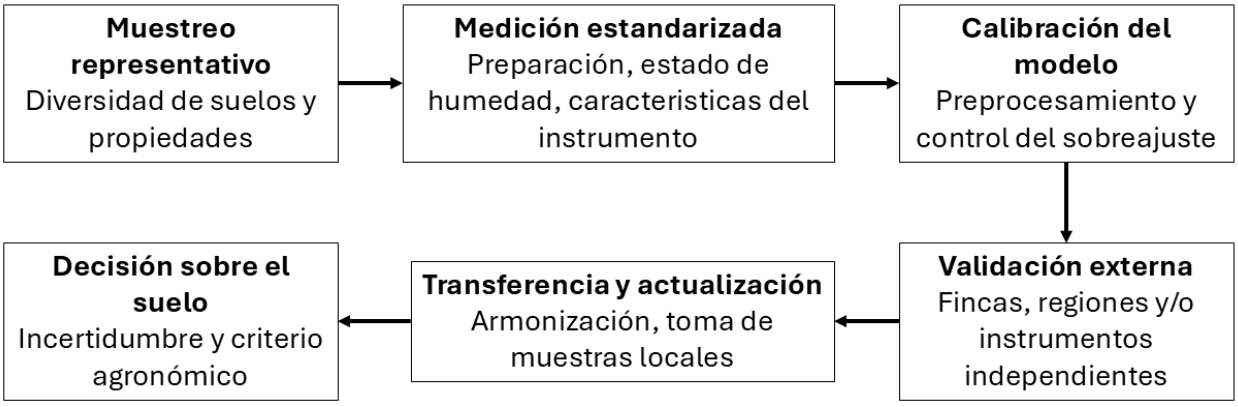
Suelos Ecuatoriales 55 (1 y 2): 52-75. https://doi.org/10.47864/se552025p5275

Estas últimas propiedades se predicen por su covariación con componentes espectralmente activos; por tanto, una precisión elevada no demuestra causalidad ni garantiza transferencia a otra población (Ma et al., 2023; Viscarra Rossel et al., 2022). Además, el agua, los agregados, la rugosidad y la geometría de medición superponen o modifican las señales, especialmente en muestras húmedas o intactas (Xie & Wu, 2025; Park et al., 2024).

La predicción combina análisis convencionales y espectros de una población representativa, seguidos por control de calidad, preprocesamiento, selección de variables, calibración y validación. La regresión por mínimos cuadrados parciales (PLSR, por sus iniciales en inglés) continúa como referencia, junto con métodos no lineales, modelos locales y redes neuronales (Zhang et al., 2023; Wang et al., 2024). La validación debe reproducir el uso previsto: una partición aleatoria estima interpolación interna, pero la transferencia a nuevas fincas, profundidades, regiones o instrumentos exige excluir grupos completos. En consecuencia, el desempeño pertenece al sistema formado por población, protocolo, modelo y dominio de aplicación, no al algoritmo de manera aislada (Weerasekara et al., 2026; Ma et al., 2023; Shu et al., 2026).

La transición desde un modelo experimental hasta una aplicación operativa requiere controlar de forma consecutiva la representatividad, la medición, la calibración, la validación, la transferencia y la incertidumbre asociada con la decisión (Figura 1).

Figura 1. Etapas y factores críticos para convertir una calibración espectroscópica experimental en una herramienta operativa de caracterización del suelo. La transferencia y la toma de decisiones requieren validación independiente, actualización con muestras locales e incertidumbre compatible con el uso agronómico previsto.



Propiedades con mayor potencial de predicción

El potencial predictivo varía según la actividad espectral de cada propiedad y la representatividad de la calibración.

Carbono, materia orgánica y nitrógeno total

El carbono y la materia orgánica son las propiedades más estudiadas y generalmente mejor predichas; su respuesta se relaciona con el oscurecimiento visible y con absorciones de grupos funcionales en NIR y MIR. El nitrógeno total también puede estimarse, en parte por su asociación con la materia orgánica. Un metaanálisis de 134 estudios confirmó el desarrollo alcanzado por Vis–NIR para carbono orgánico, pero mostró que el desempeño cambia significativamente con el preprocesamiento, el entorno de medición y el diseño de validación (Chinilin et al., 2023).

MIR aporta mayor especificidad para separar formas de carbono: en suelos calcáreos iraníes alcanzó R^2 superiores a 0,90 y razones de desempeño a desviación (RPD) iguales o mayores que 3 para carbono total, orgánico e inorgánico. La menor precisión obtenida para fracciones lábiles indica, sin embargo, que un modelo robusto para concentraciones totales no necesariamente representa componentes pequeños o dinámicos (Sepahvand et al., 2019).

En una biblioteca MIR estadounidense con alta diversidad edáfica, los modelos globales de carbono total alcanzaron R^2 de validación entre 0,96 y 0,99. Las redes neuronales convolucionales y Cubist superaron a PLSR, pero esa ventaja dependió del volumen y la distribución de las muestras y no puede extrapolarse automáticamente a bibliotecas pequeñas o regionales (Weerasekara et al., 2026). La espectroscopía también se ha extendido a fracciones de carbono particulado y asociado con microagregados, junto con óxidos de hierro, aluminio y manganeso vinculados con su estabilización; los enfoques composicionales permiten conservar la suma de los componentes y reducir valores extremos (Zhao et al., 2023). La principal barrera de campo continúa siendo la humedad, cuyas absorciones alrededor de 1400 y 1900 nm pueden ocultar rasgos del carbono. La estratificación y las correcciones externas recuperan parte de la precisión, pero los modelos deben representar los intervalos reales de humedad, rugosidad y mineralogía de la aplicación (Xie & Wu, 2025).

Textura, mineralogía y propiedades hidráulicas

La textura puede estimarse por las absorciones de arcillas, óxidos y minerales y por la dispersión asociada con el tamaño de partícula; arcilla y arena suelen predecirse mejor que limo, una fracción sin respuesta mineralógica exclusiva (Soriano-Disla et al., 2014; Gozukara et al., 2025). En una biblioteca de 1535 muestras del sur de Brasil, la estratificación espectral y edáfica elevó el desempeño para arcilla hasta R^2 = 0,84, con errores cercanos a 6 %. Las regiones más informativas se localizaron entre 480–550 y 850–900 nm, además de las zonas próximas a 1400, 1900 y 2200 nm; el desempeño disminuyó en los grupos más heterogéneos, confirmando que el número de muestras no sustituye la representatividad (Costa et al., 2022). En suelos algodoneros australianos, los modelos locales también superaron a los calibrados con seis zonas y evaluados en una séptima no representada. La incorporación dirigida de pocas muestras locales (spiking) mejoró las predicciones, mostrando que incluso una biblioteca extensa puede requerir actualización cuando cambia la mineralogía (Zhao et al., 2018).

Arena, limo y arcilla deben modelarse como datos composicionales cuya suma es 100 %; las transformaciones de razones y los modelos informados por restricciones físicas reducen resultados incompatibles y permiten recuperar distribuciones continuas del tamaño de partícula (Zhao et al., 2023; Norouzi et al., 2026). La señal espectral también integra textura, materia orgánica y mineralogía, factores que controlan la retención de agua. En muestras estadounidenses, MIR alcanzó R^2 = 0,80 tanto para capacidad de campo como para punto de marchitez permanente, frente a 0,65 y 0,70 con Vis–NIR, respectivamente, y superó las funciones de pedotransferencia (Gamagedara et al., 2026). Otra estrategia recuperó la curva de retención durante el secado mediante SWIR, con R^2 = 0,96 y error de 0,03 $m^3\ m^{-3}$ en 21 suelos, reduciendo a horas un procedimiento que puede requerir semanas. Por su tamaño de evaluación y sus supuestos ópticos, todavía debe considerarse una metodología emergente y no un sustituto general de las mediciones hidráulicas de referencia (Norouzi et al., 2022, 2023).

Suelos Ecuatoriales 55 (1 y 2): 52-75. https://doi.org/10.47864/se552025p5275

pH, salinidad, nutrientes y propiedades biológicas

El pH se predice indirectamente mediante asociaciones con materia orgánica, carbonatos, arcillas y óxidos. En suelos negros con concreciones calcáreas, la selección genética de variables combinada con máquinas de aprendizaje extremo alcanzó R^2 = 0,86 y RPD = 2,64 (Wang & Wang, 2022). En suelos colombianos cultivados con caña panelera, Vis–NIR alcanzó R^2 = 0,81 para pH, pero menor precisión para materia orgánica y cationes intercambiables; esto respalda calibraciones regionales, no la transferencia sin ajuste a otras clases de suelo (Delgadillo-Duran et al., 2022). La conductividad eléctrica es más variable: en una biblioteca global, XGBoost obtuvo R^2 = 0,59 frente a 0,39 con PLSR. Estas cifras moderadas y las diferencias regionales muestran que la amplitud geográfica no garantiza una respuesta homogénea para salinidad (Zhou et al., 2022).

Los nutrientes totales suelen predecirse mejor que las formas disponibles. El nitrógeno total se beneficia de su covariación con la materia orgánica, mientras fósforo, potasio y micronutrientes dependen de asociaciones locales con arcillas, óxidos y carbono. En núcleos intactos de arrozales, los modelos no lineales fueron satisfactorios para materia orgánica y nitrógeno total, cuantitativos para fósforo total e insuficientes para potasio total; en otra población agrícola, el carbono orgánico alcanzó R^2 cercanos a 0,82–0,84, mientras fósforo disponible y zinc mostraron desempeños menores (Xu et al., 2018; Singha et al., 2023). Algunas propiedades indirectas mejoran cuando existen gradientes amplios y relaciones estables. Los parámetros de sorción de fósforo alcanzaron R^2 de validación de 0,65–0,85 mediante redes neuronales, con mejoras de 19–59 % respecto a PLSR (Saidi et al., 2025). En viñedos del sur de Brasil, cobre y zinc disponibles presentaron R^2 superiores a 0,90 con bosques aleatorios y primera derivada de Savitzky–Golay. Ambos resultados requieren validación cuando cambian la mineralogía, el manejo o las fuentes de los elementos (Sangoi et al., 2025).

MIR permite estimar simultáneamente numerosas propiedades. En la biblioteca del USDA, un solo espectro produjo alta precisión para 50 propiedades y aproximó otras 44 relacionadas con producción, almacenamiento de carbono y agua, ciclo de nutrientes y hábitat (Ng et al., 2022). En Corea del Sur, MIR generó modelos útiles para materia orgánica, nitrógeno, pH y algunos nutrientes destinados a recomendaciones de fertilización, aunque el desempeño no fue equivalente para todas las variables; la utilidad agronómica depende de que el error no cambie la categoría o la recomendación (Jeon et al., 2024). Las propiedades biológicas siguen siendo una frontera menos consolidada: MIR muestra potencial para respiración, biomasa y actividades enzimáticas (Nath et al., 2021; Ghimire et al., 2025), pero la transferencia entre ecosistemas es limitada y la fusión con NIR aporta mejoras pequeñas, coherentes con relaciones predominantemente indirectas (Irving et al., 2026).

La evidencia más consolidada corresponde al carbono, la materia orgánica, la textura, la mineralogía y el pH, mientras que las propiedades indirectas muestran mayor dependencia del dominio de calibración (Tabla 1).

Tabla 1. Potencial predictivo de diferentes grupos de propiedades del suelo.

Grupo de propiedades	Región espectral más utilizada	Fundamento espectral	Nivel actual de evidencia	Principal limitación	Referencias
Carbono y materia orgánica	Vis–NIR y MIR	Color y absorciones de grupos orgánicos	Alto	Humedad y fracciones lábiles	Chinilin et al. (2023); Sepahvand et al. (2019); Weerasekara et al. (2026)
Textura y mineralogía	MIR y Vis–NIR	Absorciones minerales y dispersión por partículas	Alto para arcilla y arena	Menor precisión para limo y nuevas mineralogías	Soriano-Disla et al. (2014); Costa et al. (2022); Gozukara et al. (2025)
Humedad y propiedades hidráulicas	NIR–SWIR y MIR	Absorciones del agua y relación con la matriz del suelo	Moderado	Sensibilidad al estado y empaquetamiento de la muestra	Norouzi et al. (2022, 2023); Gamagedara et al. (2026)
pH, carbonatos y salinidad	Vis–NIR y MIR	Asociaciones con carbonatos, arcillas, óxidos y sales	Moderado; variable para salinidad	Predicción indirecta y baja transferencia regional	Wang y Wang (2022); Zhou et al. (2022); Delgadillo-Duran et al. (2022)
Nutrientes y elementos traza	Principalmente MIR	Covariación con materia orgánica, arcillas y óxidos	Moderado para totales; variable para disponibles	Relaciones locales y escasa actividad espectral directa	Xu et al. (2018); Singha et al. (2023); Saidi et al. (2025)
Propiedades biológicas y salud del suelo	MIR	Asociaciones con carbono, nitrógeno, arcillas y humedad	Emergente	Predicción indirecta y limitada validación externa	Nath et al. (2021); Ghimire et al. (2025); Irving et al. (2026)

Avances metodológicos: del preprocesamiento a las bibliotecas espectrales

La confiabilidad de los modelos depende del preprocesamiento, la calibración, la biblioteca espectral y la estrategia de validación.

Preprocesamiento y selección de variables

El preprocesamiento busca reducir dispersión, ruido, humedad y efectos de partícula mediante absorbancia, variable normal estándar, corrección multiplicativa, suavizado y derivadas (Rinnan et al., 2009). La variable normal estándar y la corrección multiplicativa actúan principalmente sobre cambios aditivos o multiplicativos; las derivadas separan absorciones y corrigen la línea base, pero pueden amplificar el ruido, especialmente en los extremos espectrales. El suavizado previo atenúa ese efecto, aunque ventanas excesivas pueden eliminar rasgos informativos (Kuang & Mouazen, 2013; Dotto et al., 2018).

Suelos Ecuatoriales 55 (1 y 2): 52-75. https://doi.org/10.47864/se552025p5275

Ningún procedimiento es universalmente superior: una transformación puede beneficiar el carbono y perjudicar pH, arcilla o nutrientes. Por ello, debe seleccionarse para cada propiedad dentro de la calibración y confirmarse posteriormente en un conjunto independiente (Nawar et al., 2016).

La selección de variables y el remuestreo reducen redundancia, multicolinealidad y costo computacional. En algunos conjuntos, menos del 5 % de las longitudes de onda mantuvo un desempeño semejante al espectro completo, lo que favorece sensores portátiles con pocas bandas (Vasques et al., 2008; Nawar et al., 2016). Sin embargo, las bandas útiles y la resolución requerida cambian con la mineralogía, la humedad y la propiedad; una configuración adecuada para carbono puede perder absorciones necesarias para diferenciar minerales o carbonatos (Hateffard et al., 2025). Para evitar fuga de información, el preprocesamiento, las longitudes de onda y los hiperparámetros deben seleccionarse mediante validación cruzada anidada después de reservar un conjunto externo, manteniendo juntas las muestras de una misma finca, localidad o perfil.

De PLSR al aprendizaje automático y profundo

La PLSR continúa como referencia por su estabilidad, rapidez, requerimientos moderados de calibración e interpretación mediante variables latentes, aunque representa principalmente relaciones lineales (Soriano-Disla et al., 2014; Gozukara et al., 2025). Cubist, bosques aleatorios, máquinas de vectores de soporte y XGBoost pueden capturar interacciones y respuestas no lineales. Sus ventajas, sin embargo, cambian con la propiedad, el tamaño y la distribución de la calibración, el preprocesamiento y la validación: un algoritmo superior para carbono puede no serlo para humedad o nitrógeno, y una mejora interna puede desaparecer en muestras externas (Morellos et al., 2016; Tsakiridis et al., 2020; Zhou et al., 2022). Por ello, los métodos complejos deben compararse con PLSR usando exactamente las mismas particiones y métricas.

El aprendizaje basado en memoria ajusta una calibración local para cada muestra usando sus espectros más semejantes, lo que reduce la influencia de observaciones irrelevantes en bibliotecas heterogéneas. Su confiabilidad depende de la métrica, el número de vecinos y, sobre todo, de que existan análogos adecuados; el vecino más cercano no garantiza una predicción válida fuera del dominio (Ramirez-Lopez et al., 2013). Las redes convolucionales aprenden patrones jerárquicos y pueden superar a PLSR en bibliotecas grandes, pero requieren más datos, control del sobreajuste y evaluación independiente (Padarian et al., 2019; Weerasekara et al., 2026). Las técnicas explicables permiten detectar bandas influyentes y covariaciones regionales, aunque no convierten una asociación en un mecanismo causal (Ma et al., 2023). La selección final debe considerar error, sesgo, incertidumbre, transparencia y desempeño en intervalos agronómicos, no solo la precisión promedio.

Bibliotecas espectrales y tamaño de calibración

Las bibliotecas espectrales integran espectros, análisis convencionales y metadatos a escalas local, regional y global, reutilizando referencias analíticas costosas. LUCAS y la biblioteca mundial demuestran la viabilidad de organizar colecciones extensas y geográficamente diversas (Stevens et al., 2013; Viscarra Rossel et al., 2016; Shepherd et al., 2022), pero esa amplitud también introduce variación mineralógica, climática, analítica, de profundidad y manejo. Los modelos globales cubren dominios amplios, aunque pueden describir deficientemente poblaciones locales.

La estratificación y los modelos de vecinos reducen la heterogeneidad si los grupos conservan tamaño suficiente y si la similitud representa los procesos que controlan la propiedad; una partición excesiva puede dejar sin representación los extremos (Ramirez-Lopez et al., 2013; Costa et al., 2022).

La incorporación dirigida de muestras locales (spiking) puede corregir diferencias sistemáticas y ampliar el dominio, pero las muestras deben cubrir la diversidad espectral y los intervalos analíticos relevantes; una selección aleatoria puede aportar información redundante (Seidel et al., 2019; Barthès et al., 2020; Ng et al., 2022; St. Luce et al., 2022). No existe un tamaño universal de calibración. Una evaluación reciente estimó aproximadamente 150–250 muestras para calibraciones regionales, 600–1000 para nacionales y 2000–6000 para continentales, según la propiedad y el algoritmo; estos intervalos describen un diseño particular y no constituyen umbrales generales (Shu et al., 2026). Más importante que alcanzar una cifra fija es comprobar que cada incorporación cubre combinaciones ausentes y reduce el error externo. La selección puede apoyarse en distancias, cobertura y agrupamiento, pero debe integrar región, clase de suelo, profundidad y manejo, no solo similitud espectral (Dorantes et al., 2022). Finalmente, el crecimiento de la biblioteca exige armonizar métodos, unidades y metadatos para evitar que el modelo confunda variación edáfica con incompatibilidad analítica (Shepherd et al., 2022).

Las decisiones metodológicas que condicionan la precisión y la transferibilidad se sintetizan a continuación (Tabla 2).

Tabla 2. Decisiones metodológicas que condicionan la precisión y transferibilidad.

Decisión	Alternativas frecuentes	Efecto observado	Riesgo principal	Recomendación	Referencias
Preparación y humedad de la muestra	Seca y molida; húmeda; *in situ*	Mayor control en laboratorio; menor precisión al aumentar la variabilidad	Aplicar modelos de suelo seco a muestras húmedas	Igualar calibración y uso; incluir el intervalo real de humedad	Xie y Wu (2025); Song et al. (2026)
Preprocesamiento espectral	Espectro original; SNV; MSC; suavizado; derivadas	Mejora variable según propiedad y conjunto	Amplificación de ruido o pérdida de información	Seleccionar por propiedad dentro de la calibración	Dotto et al. (2018); Nawar et al. (2016)
Selección de variables o resolución	Espectro completo; bandas seleccionadas; remuestreo	Menos redundancia y costo, con precisión potencialmente similar	Bandas no transferibles o pérdida de absorciones	Comparar con el espectro completo y validar externamente	Nawar et al. (2016); Hateffard et al. (2025)
Algoritmo de calibración	PLSR; SVM; RF; Cubist; XGBoost; redes profundas	Los métodos no lineales pueden mejorar poblaciones complejas	Sobreajuste y baja interpretabilidad	Comparar con PLSR usando las mismas particiones	Gozukara et al. (2025); Weerasekara et al. (2026)

Suelos Ecuatoriales 55 (1 y 2): 52-75. https://doi.org/10.47864/se552025p5275

Escala y composición de la biblioteca	Local; estratificada; global; calibración local; incorporación dirigida de muestras locales (spiking)	Mayor cobertura, pero también mayor heterogeneidad	Mucha información con escasa representatividad local	Priorizar diversidad y añadir muestras locales dirigidas	Costa et al. (2022); St. Luce et al. (2022)
Estrategia de validación	Aleatoria; cruzada anidada; espacial; externa	El desempeño disminuye al aumentar la independencia	Fuga de información y estimaciones optimistas	Excluir fincas, perfiles, regiones o instrumentos según el uso	Zhou et al. (2022); Tong y Liu (2025)
Transferencia entre instrumentos o regiones	Estandarización; transferencia; recalibración; aprendizaje por transferencia	Puede reducir diferencias, pero no siempre mejora la predicción	Corrección incompleta o transferencia fuera del dominio	Usar muestras representativas y comprobar el resultado externamente	Sanderman et al. (2023); Ng et al. (2024)

Transferibilidad y aplicación operativa

La aplicación operativa exige comprobar la estabilidad del modelo ante cambios de muestra, instrumento, región y profundidad.

Del laboratorio a la medición en campo

El laboratorio mejora la repetibilidad mediante secado, molienda, tamizado y geometría controlada, pero se distancia del suelo intacto. En campo, humedad, estructura, residuos, iluminación, temperatura y contacto irregular modifican la señal; el agua es la interferencia principal por sus absorciones intensas alrededor de 1400 y 1900 nm. La estratificación por humedad, la ortogonalización de parámetros externos y la inclusión de muestras húmedas reducen parte del efecto, pero ninguna corrección funciona universalmente entre texturas, mineralogías y contenidos de carbono (Xie & Wu, 2025). La precisión suele disminuir en el orden laboratorio, medición in situ, vehículo aéreo no tripulado y satélite a medida que aumentan la mezcla espacial y las condiciones ambientales, aunque también crece la cobertura territorial (Song et al., 2026). Por ello, los sensores portátiles deben evaluarse por su capacidad para conservar categorías de fertilidad o recomendaciones, especialmente en propiedades químicas indirectas, y no únicamente por R^2 (Najdenko et al., 2024).

Transferencia entre instrumentos y laboratorios

Instrumentos que cubren la misma región pueden diferir en resolución, detector, óptica, fuente y procedimiento de referencia. En una biblioteca MIR estadounidense, la estandarización mediante muestras compartidas corrigió gran parte de la variación entre dos espectrómetros y permitió predicciones favorables de carbono total, arcilla y pH, aunque necesitó muestras de transferencia representativas y no benefició por igual todas las propiedades (Sanderman et al., 2023). En una evaluación global con cuatro instrumentos MIR, algunas transformaciones armonizaron adecuadamente los espectros sin mejorar de forma consistente las predicciones; en ciertos casos, calibrar directamente el equipo secundario fue comparable o superior (Ng et al., 2024). La heterogeneidad también es procedimental: una evaluación internacional encontró que 62 % de los laboratorios empleaba protocolos

propios de medición. Secado, molienda, tamaño de partícula, recipiente, repeticiones y estándares pueden introducir diferencias aun con el mismo espectrómetro (Sharififar et al., 2025). Protocolos, controles y metadatos comunes son, por tanto, indispensables; bibliotecas abiertas como la húngara aportan la trazabilidad necesaria para comparar y actualizar modelos (Mészáros et al., 2025).

Transferencia entre regiones y profundidades

La extrapolación espacial y vertical es más exigente que la interpolación dentro de una biblioteca. Al cambiar de región se modifican mineralogía, material parental, clima, manejo y las covariaciones que sostienen predicciones indirectas; por ello, añadir coordenadas puede mejorar la evaluación interna y, al mismo tiempo, inducir al modelo a aprender patrones geográficos no transferibles (Tong & Liu, 2025). Los horizontes subsuperficiales suelen contener menos materia orgánica y diferentes proporciones de arcillas, óxidos y carbonatos, de modo que los modelos superficiales pueden producir sesgo sistemático; se requieren bibliotecas multiestrato o profundidad explícita (Renuka et al., 2026). Los atributos del terreno y las covariables ambientales aportan información sobre formación y redistribución del suelo, pero deben estar disponibles con calidad y escala equivalentes en el área objetivo (Rizzo et al., 2016; Dai et al., 2026). El aprendizaje por transferencia puede reutilizar representaciones globales y actualizarlas con pocas muestras locales, aunque continúa necesitando comprobación externa del dominio (Hong et al., 2026).

Validación externa, dominio de aplicación e incertidumbre

La validación debe reproducir el uso previsto y excluir por completo fincas, perfiles, regiones o instrumentos cuando se pretenda transferir el modelo. La diferencia frente a una evaluación interna puede ser considerable: en una biblioteca global de salinidad, XGBoost alcanzó R^2 = 0,59 y aumentó a 0,71 al incorporar covariables ambientales, pero descendió a aproximadamente 0,44–0,45 en dos validaciones regionales. Además, el predominio de suelos no salinos limitó la representación del intervalo más importante para el diagnóstico (Zhou et al., 2022). Antes de predecir, deben comprobarse distancias espectrales, posición en componentes principales, densidad de vecinos y valores atípicos. Fuera del dominio, corresponde señalar la incertidumbre, analizar convencionalmente o actualizar la calibración. El desempeño debe reportarse mediante error cuadrático medio, error absoluto, sesgo e intervalos en unidades relevantes para la decisión, con resultados desagregados por región, profundidad o intervalo de concentración. La operación a gran escala requiere además protocolos, controles y metadatos interoperables (Peng et al., 2025).

La transferibilidad debe comprobarse para cada cambio: campo, instrumento, región o profundidad. El objetivo no es un modelo universal, sino delimitar dónde produce resultados confiables y cómo actualizarlo cuando cambia el dominio (Figura 2).

Oportunidades para Colombia y los suelos tropicales

La diversidad edáfica de Colombia favorece el uso de la espectroscopía, pero exige una implementación regional y estratificada.

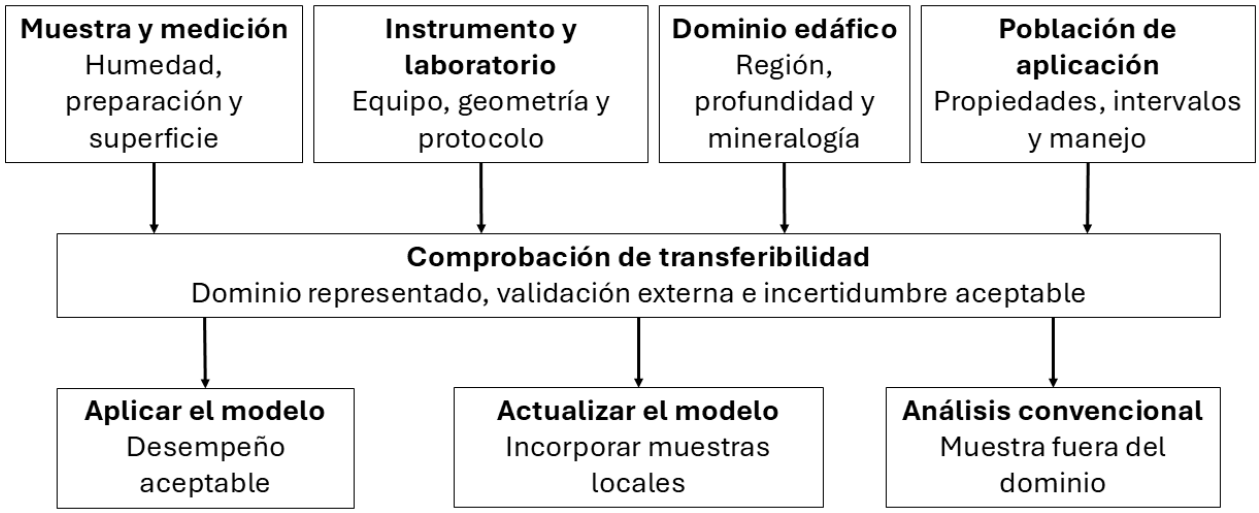
Particularidades de los suelos tropicales

Los suelos tropicales intensamente meteorizados suelen acumular caolinita y óxidos de hierro y aluminio. Sus señales favorecen la predicción de color, mineralogía y textura, pero las arcillas de baja actividad y las superficies de carga variable modifican las relaciones con pH, capacidad de intercambio catiónico y nutrientes. Los óxidos pueden aportar información sobre meteorización y, simultáneamente, dominar la región visible y ocultar variaciones orgánicas más débiles. MIR ofrece mayor especificidad para caolinita, gibbsita y otros minerales, mientras Vis–NIR conserva ventajas operativas por su portabilidad (Mendes et al., 2022). Cenizas volcánicas, materiales aluviales, profundidad

Suelos Ecuatoriales 55 (1 y 2): 52-75. https://doi.org/10.47864/se552025p5275

y régimen hídrico generan dominios distintos; por ello, "suelo tropical" no constituye una población de calibración homogénea. Colombia debería iniciar con muestras secas y controladas, estratificadas por material parental, clase de suelo, profundidad y sistema productivo. La medición de campo puede incorporarse después mediante calibraciones que representen humedad, agregación y residuos; la adaptación de bibliotecas secas a suelos tropicales intactos es posible, pero reduce la precisión y debe verificarse para cada propiedad (Ackerson et al., 2015).

Figura 2. Factores que determinan la transferibilidad de las calibraciones espectroscópicas. Los cambios en la muestra, el sistema instrumental, el dominio edáfico y la población de aplicación deben evaluarse mediante validación externa, comprobación del dominio e incertidumbre compatible con el uso previsto. El resultado determina si el modelo puede aplicarse, requiere muestras locales para su actualización o debe sustituirse por un análisis convencional.



Estudios de caso internacionales

Los estudios de caso internacionales permiten comparar desempeños obtenidos bajo dominios edáficos y objetivos muy distintos. En suelos calcáreos de Irán, la espectroscopía MIR alcanzó R^2 superiores a 0,90 y RPD iguales o mayores que 3 para carbono total, orgánico e inorgánico; las fracciones lábiles de carbono y nitrógeno fueron menos predecibles. El resultado ilustra una ventaja de MIR para componentes con absorciones definidas, pero también advierte que un desempeño alto para concentraciones totales no puede extrapolarse a fracciones pequeñas o dinámicas (Sepahvand et al., 2019).

En Estados Unidos, una biblioteca MIR con elevada diversidad edáfica produjo R^2 de validación entre 0,96 y 0,99 para carbono total. Las redes neuronales convolucionales y Cubist superaron a PLSR, aunque la ventaja dependió del tamaño y de la distribución de la biblioteca (Weerasekara et al., 2026). En otra evaluación estadounidense, MIR alcanzó R^2 = 0,80 para capacidad de campo y punto de marchitez permanente, frente a 0,65 y 0,70 con Vis–NIR, respectivamente, y superó las funciones de pedotransferencia (Gamagedara et al., 2026). Estos resultados respaldan el potencial de modelos multivariable, pero proceden de colecciones amplias y no garantizan igual precisión en una región poco representada.

Australia aporta evidencia sobre actualización local. En suelos algodoneros, los modelos calibrados para cada zona fueron más precisos que una calibración construida con seis zonas y evaluada en una séptima

no representada. La incorporación dirigida de unas pocas muestras del área objetivo (spiking) mejoró las predicciones de arcilla, mostrando que la amplitud geográfica de una biblioteca no sustituye la representación de la mineralogía local (Zhao et al., 2018). De manera complementaria, la predicción MIR de propiedades microbianas en suelos australianos mostró que la fusión con NIR produjo mejoras pequeñas y que el desempeño disminuyó al cambiar de ecosistema, coherente con el carácter predominantemente indirecto de estas relaciones (Irving et al., 2026).

En Corea del Sur, los espectros MIR permitieron desarrollar modelos para materia orgánica, nitrógeno, pH y varios nutrientes orientados a recomendaciones de fertilización. Sin embargo, la capacidad predictiva no fue uniforme entre propiedades, por lo que la evaluación agronómica debe establecer si el error conserva la clase de fertilidad y la recomendación asociada, además de reportar métricas promedio (Jeon et al., 2024). En China, la predicción de pH en suelos negros con concreciones calcáreas alcanzó $R^2 = 0,86$ y RPD = 2,64 mediante selección genética de variables y máquinas de aprendizaje extremo; este desempeño favorable continúa siendo específico de la población y del intervalo químico representados (Wang & Wang, 2022).

La experiencia latinoamericana confirma la misma dependencia del dominio. En Colombia, calibraciones Vis–NIR en suelos de caña panelera alcanzaron $R^2 = 0,81$ para pH y exactitudes de clasificación de 0,87 para pH, 0,73 para materia orgánica y 0,72 para calcio. La clasificación puede, por tanto, conservar utilidad aun cuando la predicción continua sea moderada, siempre que las categorías correspondan a decisiones agronómicas explícitas; el estudio no sustenta todavía una generalización nacional (Delgadillo-Duran et al., 2022). En Brasil, la estratificación de 1535 muestras elevó el desempeño para arcilla hasta $R^2 = 0,84$, con errores cercanos a 6 %, mientras las bibliotecas nacionales Vis–NIR–SWIR y MIR demostraron el valor de integrar colecciones y protocolos institucionales (Costa et al., 2022; Demattê et al., 2019; Mendes et al., 2022). ProBASE formalizó además la cooperación entre espectroscopía y laboratorios convencionales (Paiva et al., 2022), mientras la predicción de elementos potencialmente tóxicos confirmó que el desempeño cambia entre elementos y concentraciones extremas (Saraiva et al., 2025).

Estos casos muestran que la utilidad no depende de un país, algoritmo o región espectral aislados. Los mejores resultados aparecen cuando la propiedad posee una base espectral plausible, la calibración representa la variación edáfica relevante y la validación reproduce el cambio de dominio previsto. Las bibliotecas extensas amplían la cobertura, pero requieren estratificación, transferencia instrumental o actualización local; las propiedades indirectas exigen especial cautela cuando cambian mineralogía, manejo o métodos analíticos. Por ello, la evidencia internacional debe emplearse como referencia para diseñar y verificar sistemas regionales, no como justificación para importar calibraciones sin comprobar su desempeño local.

Aplicaciones prioritarias para Colombia

En Colombia, las primeras aplicaciones deberían concentrarse en carbono orgánico, materia orgánica, arcilla, arena, pH y mineralogía, por su respaldo espectral y su utilidad en fertilidad, zonificación del manejo, cartografía y monitoreo. La evaluación debe vincularse con decisiones: para pH, interesa conservar los intervalos que modifican el encalado; para textura, las clases que condicionan retención de agua y manejo; y para carbono, detectar cambios mayores que la incertidumbre acumulada del muestreo, el

Suelos Ecuatoriales 55 (1 y 2): 52-75. https://doi.org/10.47864/se552025p5275

laboratorio y el modelo. Fósforo disponible, cationes, micronutrientes, salinidad e indicadores biológicos deberían iniciar como herramientas de tamizaje, con una proporción mayor de análisis convencionales en los intervalos críticos.

Una ruta operativa debería comenzar con un piloto regional en un sistema productivo que disponga de muestras archivadas, referencias confiables y variación edáfica suficiente. Un objetivo inicial realista sería calibrar entre tres y cinco propiedades consolidadas y validar excluyendo fincas o localidades completas. Las instituciones participantes podrían conectar colecciones mediante un protocolo mínimo común para secado, molienda, tamizado, número de lecturas, materiales de referencia, control instrumental, unidades, métodos analíticos y metadatos. Las nuevas muestras se seleccionarían para cubrir vacíos espectrales y edáficos, en lugar de aumentar indiscriminadamente el tamaño de la biblioteca.

En la fase de servicio, cada lote debería incluir controles y un subconjunto determinado por métodos convencionales. El sistema tendría que identificar muestras fuera del dominio, reportar incertidumbre y remitir al laboratorio aquellas cuyos intervalos atraviesen umbrales agronómicos. La espectroscopía funcionaría así como una infraestructura híbrida: ampliaría la densidad de información y reduciría tiempos y reactivos, mientras los laboratorios conservarían las funciones de calibración, verificación y actualización. Esta adopción gradual conecta con la principal conclusión de la revisión: para los suelos tropicales colombianos, el avance decisivo no será un modelo universal, sino una red regional reproducible, externamente validada y capaz de generar predicciones con incertidumbre compatible con el uso previsto.

Limitaciones y prioridades de investigación

La aplicación operativa requiere priorizar la validación externa, la interoperabilidad, la incertidumbre decisional, el seguimiento temporal y la viabilidad económica.

Prioridad 1: validación verdaderamente externa

La validación debe excluir poblaciones que hayan intervenido directa o indirectamente en cualquier decisión metodológica. El conjunto externo debe reservarse antes de seleccionar preprocesamiento, bandas, algoritmo o hiperparámetros y corresponder al tipo de transferencia: fincas o localidades completas para uso regional, perfiles o intervalos para profundidad, equipos y laboratorios para interoperabilidad, y campañas para estabilidad temporal. Si se evalúan varios niveles, sus resultados deben reportarse por separado porque una sola métrica oculta qué cambio de dominio produce la pérdida de desempeño. También deben describirse los intervalos de las propiedades, clases de suelo, manejo y cobertura del espacio espectral; una validación dominada por valores medios puede ocultar errores en suelos extremos o categorías agronómicamente críticas. Los ensayos con muestras desconocidas permiten separar error analítico y error predictivo (Tavares et al., 2025). El éxito debe definirse antes de calibrar mediante error y sesgo máximos, proporción mínima dentro del dominio y precisión requerida en cada grupo externo.

Prioridad 2: estándares regionales e interoperabilidad

La interoperabilidad requiere un estándar regional mínimo para preparación, intervalo y geometría espectral, controles, unidades, métodos analíticos y metadatos. No es indispensable imponer un único instrumento, pero sí documentar cambios de lámpara, accesorio, reparación o software. Un conjunto estable de muestras representativas, acompañado por réplicas ciegas y muestras desconocidas, permitiría distinguir repetibilidad dentro del laboratorio, reproducibilidad entre

instituciones y precisión respecto al método de referencia. Armonizar espectros no corrige por sí solo incompatibilidades analíticas: dos laboratorios pueden obtener señales semejantes y discrepar en carbono, textura o nutrientes por sus métodos convencionales. Por ello, ambas fases deben integrarse, como demuestra la Open Soil Spectral Library al armonizar unidades, procedimientos, identificadores y metadatos (Safanelli et al., 2025). Para Colombia, el criterio previo a combinar colecciones sería que varios laboratorios obtuvieran predicciones equivalentes, dentro de tolerancias acordadas, al analizar el mismo conjunto de control.

Prioridad 3: incertidumbre para decisiones agronómicas

La incertidumbre debe expresarse como consecuencia agronómica. Además de R^2 y raíz del error cuadrático medio, conviene evaluar la concordancia entre categorías, la omisión de intervenciones necesarias y las recomendaciones innecesarias. Estos errores pueden tener costos distintos —pérdida de rendimiento, gasto adicional o riesgo ambiental— y compararse mediante funciones de pérdida orientadas a la decisión (Breure et al., 2022). Los intervalos de predicción también deben calibrarse: si se declara una cobertura de 95 %, aproximadamente esa proporción de observaciones externas debería quedar dentro de los límites. La amplitud debe ser suficientemente pequeña para separar los umbrales agronómicos; cuando el intervalo atraviese un umbral, el sistema debería declarar la decisión incierta y remitir la muestra al análisis convencional. El éxito consiste en reducir decisiones equivocadas sin enviar al laboratorio una fracción tan alta que se pierda la ventaja operativa.

Prioridad 4: seguimiento temporal y detección de cambios

El seguimiento temporal exige distinguir cambios reales de la incertidumbre acumulada del muestreo, la variación espacial de corta distancia, la preparación, el análisis de referencia, el instrumento y el modelo. Un modelo puede representar contrastes amplios entre suelos y, aun así, ser incapaz de detectar una variación pequeña dentro de la misma parcela. Los estudios deben conservar ubicación, profundidad, época, preparación e instrumento; incluir controles y réplicas; y estimar previamente el cambio mínimo detectable a partir de la propagación de errores (Ellinger et al., 2019). En carbono, la concentración espectral debe convertirse con cautela a reservas mediante densidad aparente, fragmentos gruesos y profundidad equivalente, porque una predicción precisa de concentración no garantiza igual precisión en el almacenamiento por unidad de área (England & Viscarra Rossel, 2018). El criterio de éxito no es obtener diferencias significativas entre fechas, sino detectar cambios superiores a un umbral predefinido manteniendo controladas las falsas alarmas.

Prioridad 5: evaluación económica y condiciones de adopción

La evaluación económica debe comparar flujos completos y no únicamente el precio de una lectura: análisis convencional, espectroscopía con controles y sistemas adaptativos que remitan al laboratorio los casos inciertos. Debe incluir inversión, preparación, mantenimiento, materiales de referencia, personal, actualización del modelo, volumen anual, tiempo de respuesta y costo de decisiones equivocadas. Para carbono, la espectroscopía puede ser más costo-efectiva al aumentar la densidad de muestreo sin sacrificar excesivamente la precisión, pero el resultado depende del diseño y del nivel de incertidumbre aceptado (Li et al., 2022). Un piloto colombiano debería registrar estos componentes durante al menos un ciclo operativo y compararlos por muestra procesada, por hectárea caracterizada y por decisión confiable. También debe cuantificar

Suelos Ecuatoriales 55 (1 y 2): 52-75. https://doi.org/10.47864/se552025p5275

qué proporción de muestras requiere análisis convencional; si esa fracción es demasiado alta, la ventaja esperada puede desaparecer. Estas prioridades desplazan el énfasis desde mejoras marginales de R^2 hacia resultados verificables: dominio validado, reproducibilidad, decisiones confiables, cambios detectables y sostenibilidad económica.

La transición desde modelos experimentales hacia sistemas espectroscópicos operativos requiere evaluar la cadena completa de generación y uso de la información. Una predicción precisa en una calibración interna no garantiza que el modelo mantenga su desempeño al cambiar la región, el tipo de suelo, la profundidad, el contenido de humedad, el instrumento o el laboratorio. Por esta razón, las futuras investigaciones deben definir explícitamente la población objetivo, representar su variabilidad edáfica y espectral, aplicar validaciones externas y comunicar la incertidumbre asociada con cada resultado. La adopción tampoco debería plantearse como una sustitución inmediata del análisis convencional, sino como un sistema híbrido en el que el laboratorio proporcione datos de referencia, controle la calidad y analice las muestras que se encuentren fuera del dominio de calibración o presenten incertidumbre elevada. En Colombia y otras regiones tropicales, esta estrategia permitiría aprovechar gradualmente las bibliotecas existentes, incorporar muestras locales y priorizar propiedades con utilidad agronómica demostrada. El criterio de éxito no debería limitarse al incremento de indicadores estadísticos, sino considerar la estabilidad entre contextos, la reducción verificable de tiempo y costos, y la capacidad de sustentar decisiones sobre caracterización, monitoreo y manejo del suelo. Así, la espectroscopía podrá consolidarse como una herramienta complementaria, escalable y científicamente controlada, cuya utilidad dependerá de la correspondencia entre el desempeño analítico, el contexto de aplicación y las exigencias de la decisión.

CONCLUSIONES

La espectroscopía Vis–NIR–MIR constituye una alternativa rápida, no destructiva y complementaria para ampliar la caracterización del suelo, con evidencia especialmente consistente para carbono y materia orgánica, textura, mineralogía, nitrógeno total y pH. Su desempeño depende tanto de la calidad de los datos de referencia, la preparación de las muestras, la representatividad de la calibración y el diseño de validación como del algoritmo utilizado. En este sentido, una mayor complejidad computacional no garantiza predicciones más confiables: los modelos avanzados solo ofrecen ventajas cuando se dispone de bibliotecas suficientemente amplias y representativas, procedimientos adecuados para controlar el sobreajuste y evaluaciones que aseguren la independencia entre los conjuntos de calibración, validación y prueba. La comparación entre regiones espectrales también debe responder al contexto de uso. MIR proporciona mayor especificidad analítica y suele alcanzar un desempeño sólido bajo condiciones controladas de laboratorio, mientras que Vis–NIR ofrece ventajas de portabilidad, rapidez y posible aplicación en campo. Por tanto, la selección de la región espectral, el instrumento y el método de modelación debe basarse en la propiedad objetivo, la escala de trabajo, la precisión requerida y las condiciones reales de implementación, y no únicamente en el valor máximo de un indicador estadístico.

La principal limitación operativa continúa siendo la transferencia de las calibraciones entre condiciones de humedad, instrumentos, laboratorios, profundidades, regiones y clases de suelo. Un modelo con buen desempeño interno puede perder precisión cuando se aplica a muestras que no representan

adecuadamente la variabilidad incorporada durante su desarrollo. En consecuencia, toda calibración debe restringirse a un dominio de aplicación explícito, comprobado mediante validación externa, análisis de similitud con la población de calibración, detección de muestras atípicas o no representadas y estimaciones de incertidumbre compatibles con el uso previsto. La evaluación debería incluir, además de coeficientes de determinación, métricas de error, sesgo, estabilidad entre grupos y capacidad para conservar el desempeño en sitios o periodos independientes. Los análisis convencionales siguen siendo indispensables para generar datos de referencia, controlar la calidad, actualizar las bibliotecas y resolver los casos que se encuentren fuera del dominio o presenten incertidumbre elevada. Por ello, la aplicación más realista no consiste en sustituir completamente el laboratorio, sino en establecer sistemas híbridos que utilicen la espectroscopía para procesar grandes volúmenes de muestras y reserven los métodos convencionales para la calibración, la verificación y las situaciones en las que una predicción incorrecta pueda afectar decisiones agronómicas o ambientales.

Para Colombia y otros ambientes tropicales, la elevada diversidad de materiales parentales, grados de meteorización, contenidos de óxidos, condiciones climáticas y sistemas de manejo exige bibliotecas regionales, protocolos armonizados y estrategias de calibración que representen explícitamente esa heterogeneidad. La implementación debería comenzar con propiedades de respuesta consolidada y problemas agronómicos concretos, para los cuales una mayor densidad de información pueda mejorar la caracterización, el monitoreo o la delimitación de áreas de manejo. Una infraestructura colaborativa entre universidades, laboratorios, instituciones públicas y productores permitiría compartir datos de referencia, establecer materiales de control, evaluar la transferencia entre equipos e incorporar progresivamente muestras locales. Los proyectos piloto deberán demostrar no solo precisión analítica, sino también estabilidad temporal, reducción verificable de costos y tiempos, proporción de muestras que todavía requieren análisis convencional y utilidad efectiva para sustentar decisiones sobre el suelo. Asimismo, la investigación futura deberá fortalecer la validación independiente, la cuantificación de incertidumbre, el seguimiento de cambios temporales y la evaluación económica bajo diferentes escalas operativas. Con estas condiciones, la espectroscopía podrá consolidarse como una herramienta científicamente controlada y escalable, capaz de complementar la infraestructura analítica existente y contribuir a una gestión más oportuna, intensiva en información y adaptada a la complejidad de los suelos tropicales.

REFERENCIAS

Ackerson, J. P., Demattê, J. A. M., & Morgan, C. L. S. (2015). Predicting clay content on field-moist intact tropical soils using a dried, ground VisNIR library with external parameter orthogonalization. Geoderma 259-260 , 196-204. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2015.06.002

Barthès, B. G., Kouakoua, E., Coll, P., Clairotte, M., Moulin, P., Saby, N. P. A., Le Cadre, E., Etayo, A., & Chevallier, T. (2020). Improvement in spectral library-based quantification of soil properties using representative spiking and local calibration – The case of soil inorganic carbon prediction by mid-infrared spectroscopy. Geoderma 369 , 114272. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114272

Breure, T. S., Haefele, S. M., Hannam, J. A., Corstanje, R., Webster, R., Moreno-Rojas, S., & Milne, A. E. (2022). A loss function to evaluate agricultural decision-making under uncertainty: a case study of soil spectroscopy. Precision Agriculture 23 (4), 1333-1353. https://doi.org/10.1007/s11119-022-09887-2

Chinilin, A. V., Vindeker, G. V., & Savin, I. Y. (2023). Vis-NIR Spectroscopy for Soil Organic Carbon Assessment: A Meta-Analysis. Eurasian Soil Science, 56(11), 1605–1617. https://doi.org/10.1134/S1064229323601841

Costa, J. J. F., Giasson, É., da Silva, E. B., Tiecher, T., de Sena, A. F. S., & de Oliveira E Silva, R. G. P. (2022). Soil texture prediction through stratification of a regional soil spectral library. Pedosphere, 32(2), 294–306. https://doi.org/10.1016/S1002-0160(21)60074-7

Dai, J., Yang, H., Maimaitituersun, A., & Maimaitiaili, K. (2026). Development and contribution analysis of a multi-depth soil organic matter prediction model integrating VIS–NIR spectroscopy and environmental covariates. Plant Soil, 520, 1249–1272. https://doi.org/10.1007/s11104-026-08325-w

Delgadillo-Duran, D. A., Vargas-García, C. A., Varón-Ramírez, V. M., Calderón, F., Montenegro, A. C., & Reyes-Herrera, P. H. (2022). Vis-NIR spectroscopy and machine learning methods to diagnose chemical properties in Colombian sugarcane soils. Geoderma Regional, 31, e00588. https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2022.e00588

Demattê, J. A. M., Dotto, A. C., Paiva, A. F. S., Sato, M. V., Dalmolin, R. S. D., de Araújo, M. D. S. B., da Silva, E. B., Nanni, M. R., ten Caten, A., Noronha, N. C., Lacerda, M. P. C., de Araújo Filho, J. C., Rizzo, R., Bellinaso, H., Francelino, M. R., Schaefer, C. E. G. R., Vicente, L. E., dos Santos, U. J., de Sá Barretto Sampaio, E. V., Menezes, R. S. C., de Souza, J. J. L. L., Abrahão, W. A. P., Coelho, R. M., Grego, C. R., Lani, J. L., Fernandes, A. R., Gonçalves, D. A. M., Silva, S. H. G., de Menezes, M. D., Curi, N., Couto, E. G., dos Anjos, L. H. C., Ceddia, M. B., Pinheiro, É. F. M., Grunwald, S., Vasques, G. M., Marques Júnior, J., da Silva, A. J., Barreto, M. C. D. V., Nóbrega, G. N., da Silva, M. Z., de Souza, S. F., Valladares, G. S., Viana, J. H. M., da Silva Terra, F., Horák-Terra, I., Fiorio, P. R., da Silva, R. C., Frade Júnior, E. F., Lima, R. H. C., Alba, J. M. F., de Souza Junior, V. S., Brefin, M. D. L. M. S., Ruivo, M. D. L. P., Ferreira, T. O., Brait, M. A., Caetano, N. R., Bringhenti, I., de Sousa Mendes, W., Safanelli, J. L., Guimarães, C. C. B., Poppiel, R. R., e Souza, A. B., Quesada, C. A., & do Couto, H. T. Z. (2019). The Brazilian Soil Spectral Library (BSSL): A general view, application and challenges. Geoderma 354 , 113793. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.05.043

Demattê, J. A. M., Paiva, A. F. D. S., Poppiel, R. R., Rosin, N. A., Ruiz, L. F. C., Mello, F. A. D. O., Minasny, B., Grunwald, S., Ge, Y., Ben Dor, E., Gholizadeh, A., Gomez, C., Chabrillat, S., Francos, N., Ayoubi, S., Fiantis, D., Biney, J. K. M., Wang, C., Belal, A., Naimi, S., Hafshejani, N. A., Bellinaso, H., Moura-Bueno, J. M., & Silvero, N. E. Q. (2022). The Brazilian Soil Spectral Service (BraSpecS): A User-Friendly System for Global Soil Spectra Communication. Remote Sensing 14 (3), 740. https://doi.org/10.3390/rs14030740

Dorantes, M. J., Fuentes, B. A., & Miller, D. M. (2022). Calibration set optimization and library transfer for soil carbon estimation using soil spectroscopy—A review. Soil Science Society of America Journal 86 (4), 879-903. https://doi.org/10.1002/saj2.20435

Dotto, A. C., Dalmolin, R. S. D., ten Caten, A., & Grunwald, S. (2018). A systematic study on the application of scatter-corrective and spectral-derivative preprocessing for multivariate prediction of soil organic carbon by Vis-NIR spectra. Geoderma 314 , 262-274. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.11.006

Ellinger, M., Merbach, I., Werban, U., & Ließ, M. (2019). Error propagation in spectrometric functions of soil organic carbon. SOIL 5 (2), 275-288. https://doi.org/10.5194/soil-5-275-2019

England, J. R., & Viscarra Rossel, R. A. (2018). Proximal sensing for soil carbon accounting. SOIL 4 (2), 101-122. https://doi.org/10.5194/soil-4-101-2018

Gamagedara, Y., Feng, G., Waiser, T., Williams, M., Tagert, M. L., Martins, V. S., & Wijewardane, N. K. (2026). Spectroscopy-based models outperform pedotransfer functions for estimating soil hydraulic properties. Catena, 269, 110099. https://doi.org/10.1016/j.catena.2026.110099

Ghimire, S., Zhang, Y., Huang, J., Majumder, E. L.-W., Hartemink, A. E., Graham, E. B., Qafoku, O., Andrews, J., & Freedman, Z. B. (2025). Using mid-infrared spectroscopy to estimate soil microbial properties at the continental scale. Applied Soil Ecology, 211, 106110. https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2025.106110

Gozukara, G., Hartemink, A. E., Huang, J., & Demattê, J. A. M. (2025). Prediction accuracy of pXRF, MIR, and Vis-NIR spectra for soil properties—A review. Soil Science Society of America Journal, 89, e70028. https://doi.org/10.1002/saj2.70028

Hateffard, F., Gumbricht, T., Ranhem, T., Breure, T., Panagos, P., & Hugelius, G. (2025). Predicting Soil Properties Using Spectral Subsets of LUCAS Visible Near-Infrared Spectroscopy Data. European Journal of Soil Science 76 (6), e70242. https://doi.org/10.1111/ejss.70242

Hong, W., Chen, Y., & Wu, C. (2026). Overcoming soil discrepancy in Vis-NIR soil organic matter prediction: A deep transfer learning framework. Remote Sensing Applications: Society and Environment, 41, 101942. https://doi.org/10.1016/j.rsase.2026.101942

Irving, D., Tran, T. K. A., Poudel, S., Tang, Y., Ng, W., Xue, P., McBratney, A. B., & Minasny, B. (2026). Infrared spectroscopy prediction of soil microbial properties across Australian soils: Drivers and limitations. Soil & Environmental Health, 4, 100205. https://doi.org/10.1016/j.seh.2026.100205

Jeon, S. H., Jang, H. J., Ng, W., Minasny, B., Kim, S. H., Shim, J. H., Roh, A., Kwon, S. i., & Yun, J. J. (2024). Predicting soil properties for fertiliser recommendation in South Korea using MIR spectroscopy. Geoderma Regional, 39, e00901. https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2024.e00901

Kuang, B., & Mouazen, A. M. (2013). Effect of spiking strategy and ratio on calibration of on-line visible and near infrared soil sensor for measurement in European farms. Soil and Tillage Research 128 , 125-136. https://doi.org/10.1016/j.still.2012.11.006

Li, S., Viscarra Rossel, R. A., & Webster, R. (2022). The cost-effectiveness of reflectance spectroscopy for estimating soil organic carbon. European Journal of Soil Science 73 (1), e13202. https://doi.org/10.1111/ejss.13202

Ma, Y., Minasny, B., Demattê, J. A. M., & McBratney, A. B. (2023). Incorporating soil knowledge into machine-learning prediction of soil properties from soil spectra. European Journal of Soil Science, 74(6), e13438. https://doi.org/10.1111/ejss.13438

Mendes, W. D. S., Demattê, J. A. M., Rosin, N. A., Terra, F. D. S., Poppiel, R. R., Urbina-Salazar, D. F., Boechat, C. L., Silva, E. B., Curi, N., Silva, S. H. G., José dos Santos, U., & Souza Valladares, G. (2022). The Brazilian soil Mid-infrared Spectral Library: The Power of the Fundamental Range. Geoderma 415 , 115776. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2022.115776

Morellos, A., Pantazi, X.-E., Moshou, D., Alexandridis, T., Whetton, R., Tziotzios, G., Wiebensohn, J., Bill, R., & Mouazen, A. M. (2016). Machine learning based prediction of soil total nitrogen, organic carbon and moisture content by using VIS-NIR spectroscopy. Biosystems Engineering 152 , 104-116. https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2016.04.018

Mészáros, J., Kovács, Z., László, P., Vass-Meyndt, S., Koós, S., Pirkó, B., Szűcs-Vásárhelyi, N., Bakacsi, Z., Laborczi, A., Balog, K., & Pásztor, L. (2025). Vis-NIR soil spectral library of the Hungarian Soil Degradation Observation System. Scientific Data, 12(1), 363. https://doi.org/10.1038/s41597-025-04667-9

Najdenko, E., Lorenz, F., Dittert, K., & Olfs, H.-W. (2024). Rapid in-field soil analysis of plant-available nutrients and pH for precision agriculture a review. Precision Agriculture, 25(6), 3189–3218. https://doi.org/10.1007/s11119-024-10181-6

Nath, D., Laik, R., Meena, V. S., Pramanick, B., & Singh, S. K. (2021). Can mid-infrared (mid-IR) spectroscopy evaluate soil conditions by predicting soil biological properties? Soil Security, 4, 100008. https://doi.org/10.1016/j.soisec.2021.100008

Nawar, S., Buddenbaum, H., Hill, J., Kozak, J., & Mouazen, A. M. (2016). Estimating the soil clay content and organic matter by means of different calibration methods of vis-NIR diffuse reflectance spectroscopy. Soil and Tillage Research 155 , 510-522. https://doi.org/10.1016/j.still.2015.07.021

Ng, W., Minasny, B., Jeon, S. H., & McBratney, A. (2022). Mid-infrared spectroscopy for accurate measurement of an extensive set of soil properties for assessing soil functions. Soil Security, 6, 100043. https://doi.org/10.1016/j.soisec.2022.100043

Ng, W., Winowiecki, L. A., Karari, V., Weullow, E., Ateku, D. A., Vågen, T.-G., Pittaki, Z., & Minasny, B. (2024). Exploring mid-infrared spectral transfer functions for the prediction of multiple soil properties using a global dataset. Soil Science Society of America Journal, 88(4), 1234–1247. https://doi.org/10.1002/saj2.20697

Norouzi, S., Sadeghi, M., Tuller, M., Liaghat, A., Jones, S. B., & Ebrahimian, H. (2022). A novel physical-empirical model linking shortwave infrared reflectance and soil water retention. Journal of Hydrology, 614, 128653. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.128653

Norouzi, S., Sadeghi, M., Tuller, M., Ebrahimian, H., Liaghat, A., Jones, S. B., & de Jonge, L. W. (2023). A novel laboratory method for the retrieval of the soil water retention curve from shortwave infrared reflectance. Journal of Hydrology, 626, 130284. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2023.130284

Norouzi, S., Greve, M. H., Moldrup, P., Minasny, B., Zaresourmanabad, M., Pesch, C., Gomes, L., Arthur, E., Norgaard, T., Knadel, M., Greve, M. B., & de Jonge, L. W. (2026). A Physics-Informed Neural Network for Retrieving the Continuous Soil Particle Size Distribution From Vis-NIR Spectra. European Journal of Soil Science, 77(1), e70264. https://doi.org/10.1111/ejss.70264

Padarian, J., Minasny, B., & McBratney, A. B. (2019). Using deep learning to predict soil properties from regional spectral data. Geoderma Regional 16 , e00198. https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2018.e00198

Paiva, A. F. D. S., Poppiel, R. R., Rosin, N. A., Greschuk, L. T., Rosas, J. T. F., & Demattê, J. A. M. (2022). The Brazilian Program of soil analysis via spectroscopy (ProBASE): Combining spectroscopy and wet laboratories to understand new technologies. Geoderma 421, 115905. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2022.115905

Park, S., Jeon, S., Kwon, N. H., Kwon, M., Shin, J. H., Kim, W. C., & Lee, J. G. (2024). Application of near-infrared spectroscopy to predict chemical properties in clay rich soil: A review. European Journal of Agronomy, 159, 127228. https://doi.org/10.1016/j.eja.2024.127228

Peng, Y., Ben-Dor, E., Biswas, A., Chabrillat, S., Demattê, J. A. M., Ge, Y., Gholizadeh, A., Gomez, C., Guerrero, C., Herrick, J., Maynard, J. J., Mouazen, A. M., Ma, Y., McBratney, A. B., Minasny, B., Ramirez-Lopez, L., Robertson, A. H. J., Rossel, R. A. V., Shi, Z., Stenberg, B., Wadoux, A. M. J.-C., Winowiecki, L. A., & Zhang, G. (2025). Spectroscopic solutions for generating new global soil information. The Innovation, 6(5), 100839. https://doi.org/10.1016/j.xinn.2025.100839

Ramirez-Lopez, L., Behrens, T., Schmidt, K., Stevens, A., Demattê, J. A. M., & Scholten, T. (2013). The spectrum-based learner: A new local approach for modeling soil vis–NIR spectra of complex datasets. Geoderma 195-196 , 268-279. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2012.12.014

Renuka, K. P., Dharumarajan, S., Lalitha, M., Vasundhara, R., Kalaiselvi, B., & Sathish, A. (2026). Soil Property Prediction with Vis-NIR Spectroscopy in Different Depths: Testing the Robustness of Topsoil-Derived Models. Journal of the Indian Society of Remote Sensing, 54, 3687–3699. https://doi.org/10.1007/s12524-026-02518-7

Rinnan, Å., van den Berg, F. W. J., & Engelsen, S. B. (2009). Review of the most common pre-processing techniques for near-infrared spectra. TrAC Trends in Analytical Chemistry, 28(10), 1201–1222. https://doi.org/10.1016/j.trac.2009.07.007

Rizzo, R., Demattê, J. A. M., Lepsch, I. F., Gallo, B. C., & Fongaro, C. T. (2016). Digital soil mapping at local scale using a multi-depth Vis-NIR spectral library and terrain attributes. Geoderma, 274, 18–27. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2016.03.019

Safanelli, J. L., Hengl, T., Parente, L. L., Minarik, R., Bloom, D. E., Todd-Brown, K., Gholizadeh, A., Mendes, W. D. S., & Sanderman, J. (2025). Open Soil Spectral Library (OSSL): Building reproducible soil calibration models through open development and community engagement. PLOS ONE 20 (1), e0296545. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0296545

Saidi, S., Ayoubi, S., Shirvani, M., Mireei, S. A., Ge, Y., Zhao, K., & Cerda`, A. (2025). Use of Vis-NIR reflectance spectroscopy for estimating soil phosphorus sorption parameters at the watershed scale. Soil & Tillage Research, 248, 106460. https://doi.org/10.1016/j.still.2025.106460

Sanderman, J., Gholizadeh, A., Pittaki-Chrysodonta, Z., Huang, J., Safanelli, J. L., & Ferguson, R. (2023). Transferability of a large mid-infrared soil spectral library between two Fourier-transform infrared spectrometers. Soil Science Society of America Journal, 87(3), 586–599. https://doi.org/10.1002/saj2.20513

Sangoi, D. V. D. S., Dalmolin, R. S. D., Moura-Bueno, J. M., Pedron, F. D. A., Brunetto, G., Hindersmann, J., Grando, D. L., & Fontana, A. E. (2025). Combining Vis-NIR-SWIR Spectroscopy and Machine Learning to Predict Soil Available Copper and Zinc in Southern Brazil Vineyards. Journal of Soil Science and Plant Nutrition, 25(4), 4439–4453. https://doi.org/10.1007/s42729-025-02407-x

Saraiva, P. C., Mendes, W. d. S., Nascimento, C. W. A. d., Morais, P. G. C. d., Cardoso, K. M., Nascimento, C. C., Demattê, J. A. M., & Boechat, C. L. (2025). Estimating potentially toxic elements in Brazilian tropical soils with vis-NIR spectroscopy and machine learning. Soil Security, 21, 100217. https://doi.org/10.1016/j.soisec.2025.100217

Seidel, M., Hutengs, C., Ludwig, B., Thiele-Bruhn, S., & Vohland, M. (2019). Strategies for the efficient estimation of soil organic carbon at the field scale with vis-NIR spectroscopy: Spectral libraries and spiking vs. local calibrations. Geoderma 354 , 113856. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.07.014

Sepahvand, H., Mirzaeitalarposhti, R., Beiranvand, K., Feizian, M., & Müeller, T. (2019). Prediction of soil carbon levels in calcareous soils of Iran by mid-infrared reflectance spectroscopy. Environmental Pollutants and Bioavailability, 31(1), 9–17. https://doi.org/10.1080/09542299.2018.1549961

Sharififar, A., Francos, N., Ng, W., Minasny, B., Gholizadeh, A., Karunaratne, S., & McBratney, A. (2025). Navigating the challenges of spectral soil sensing: Key solutions for success. Soil & Environmental Health, 3, 100160. https://doi.org/10.1016/j.seh.2025.100160

Shepherd, K. D., Ferguson, R., Hoover, D., van Egmond, F., Sanderman, J., & Ge, Y. (2022). A global soil spectral calibration library and estimation service. Soil Security 7 , 100061. https://doi.org/10.1016/j.soisec.2022.100061

Shu, W., Price, G. W., Lynch, D., Burton, D. L., & Heung, B. (2026). Predicting soil health properties across different agricultural land use systems using mid-infrared spectroscopy. Geoderma, 471, 117873. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2026.117873

Singha, C., Swain, K. C., Sahoo, S., & Govind, A. (2023). Prediction of soil nutrients through PLSR and SVMR models by VIs-NIR reflectance spectroscopy. The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Sciences, 26, 901–918. https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2023.10.005

Song, Q., Hu, J., Li, L., Li, S., & Lu, X. (2026). Estimation and mapping of soil texture content combining ground-based sensing, UAVs, and satellite imagery. Environmental Earth Sciences, 85(218), 1–22. https://doi.org/10.1007/s12665-026-12944-y

Soriano-Disla, J. M., Janik, L. J., Viscarra Rossel, R. A., Macdonald, L. M., & McLaughlin, M. J. (2014). The Performance of Visible, Near-, and Mid-Infrared Reflectance Spectroscopy for Prediction of Soil Physical, Chemical, and Biological Properties. Applied Spectroscopy Reviews, 49(2), 139–186. https://doi.org/10.1080/05704928.2013.811081

St. Luce, M., Ziadi, N., & Viscarra Rossel, R. A. (2022). GLOBAL-LOCAL: A new approach for local predictions of soil organic carbon content using large soil spectral libraries. Geoderma 425 , 116048. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2022.116048

Stevens, A., Nocita, M., Tóth, G., Montanarella, L., & van Wesemael, B. (2013). Prediction of Soil Organic Carbon at the European Scale by Visible and Near InfraRed Reflectance Spectroscopy. PLoS ONE 8 (6), e66409. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0066409

Swan, T., Jang, H. J., Huang, Y.-C., Fidelis, C., Yinil, D., Bala, B. S., Das, B. S., & Field, D. (2026). Comparative analysis of Vis-NIR and MIR spectroscopy for predicting soil properties and identifying minerals at smallholder cocoa farms across Papua New Guinea. Soil Advances, 5, 100094. https://doi.org/10.1016/j.soilad.2025.100094

Tavares, T. R., Demattê, J. A. M., Mouazen, A. M., Ben-Dor, E., Anselmi, A. A., Campos, V. M. D. A., Minasny, B., Silva, S. H. G., Chabrillat, S., Karyotis, K., Cantarella, H., Andrade, C. A., Cherubin, M. R., de Carvalho, H. W. P., & Lavres, J. (2025). Proficiency tests for soil analysis services via proximal sensing. Geoderma 460 , 117434. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2025.117434

Tong, Z., & Liu, L. (2025). SpatialFormer: A Model to Estimate Soil Organic Carbon Content Using Spectral and Spatial Information. Journal of Soil Science and Plant Nutrition, 25, 3259–3271. https://doi.org/10.1007/s42729-025-02333-y

Tsakiridis, N. L., Keramaris, K. D., Theocharis, J. B., & Zalidis, G. C. (2020). Simultaneous prediction of soil properties from VNIR-SWIR spectra using a localized multi-channel 1-D convolutional neural network. Geoderma 367 , 114208. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114208

Vasques, G. M., Grunwald, S., & Sickman, J. O. (2008). Comparison of multivariate methods for inferential modeling of soil carbon using visible/near-infrared spectra. Geoderma 146 (1-2), 14-25. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2008.04.007

Viscarra Rossel, R. A., Behrens, T., Ben-Dor, E., Brown, D. J., Demattê, J. A. M., Shepherd, K. D., Shi, Z., Stenberg, B., Stevens, A., Adamchuk, V., Aïchi, H., Barthès, B. G., Bartholomeus, H. M., Bayer, A. D., Bernoux, M., Böttcher, K., Brodský, L., Du, C. W., Chappell, A., Fouad, Y., Genot, V., Gomez, C., Grunwald, S., Gubler, A., Guerrero, C., Hedley, C. B., Knadel, M., Morrás, H. J. M., Nocita, M., Ramirez-Lopez, L., Roudier, P., Campos, E. M. R., Sanborn, P., Sellitto, V. M., Sudduth, K. A., Rawlins, B. G., Walter, C., Winowiecki, L. A., Hong, S. Y., & Ji, W. (2016). A global spectral library to characterize the world's soil. Earth-Science Reviews 155 , 198-230. https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2016.01.012

Viscarra Rossel, R. A., Behrens, T., Ben-Dor, E., Chabrillat, S., Demattê, J. A. M., Ge, Y., Gomez, C., Guerrero, C., Peng, Y., Ramirez-Lopez, L., Shi, Z., Stenberg, B., Webster, R., Winowiecki, L., & Shen, Z. (2022). Diffuse reflectance spectroscopy for estimating soil properties: A technology for the 21st century. European Journal of Soil Science, 73(4), e13271. https://doi.org/10.1111/ejss.13271

Wang, L., & Wang, R. (2022). Determination of soil pH from Vis-NIR spectroscopy by extreme learning machine and variable selection: A case study in lime concretion black soil. Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy, 283, 121707. https://doi.org/10.1016/j.saa.2022.121707

Wang, Z., Chen, S., Lu, R., Zhang, X., Ma, Y., & Shi, Z. (2024). Non-linear memory-based learning for predicting soil properties using a regional vis-NIR spectral library. Geoderma, 441, 116752. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2023.116752

Weerasekara, M., Hartemink, A. E., Maynard, J., Demain, E., & Zhang, Y. (2026). Leveraging soil spectral libraries for property prediction: global versus local mid-infrared models and the determinants of predictability. Geoderma, 472, 117950. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2026.117950

Xie, A., & Wu, W. (2025). Evaluating the impact of soil moisture variation on the performance of visible and near-infrared (Vis–NIR) spectroscopy for predicting soil organic carbon content. Environmental Monitoring and Assessment, 197(1221). https://doi.org/10.1007/s10661-025-14726-8

Xu, S., Zhao, Y., Wang, M., & Shi, X. (2018). Comparison of multivariate methods for estimating selected soil properties from intact soil cores of paddy fields by Vis–NIR spectroscopy. Geoderma, 310, 29–43. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.09.013

Zhang, X., Xue, J., Xiao, Y., Shi, Z., & Chen, S. (2023). Towards Optimal Variable Selection Methods for Soil Property Prediction Using a Regional Soil Vis-NIR Spectral Library. Remote Sensing, 15(2), 465. https://doi.org/10.3390/rs15020465

Zhao, D., Zhao, X., Khongnawang, T., Arshad, M., & Triantafilis, J. (2018). A Vis-NIR Spectral Library to Predict Clay in Australian Cotton Growing Soil. Soil Science Society of America Journal. doi:10.2136/sssaj2018.03.0100

Zhao, P., Fallu, D. J., Pears, B. R., Allonsius, C., Lembrechts, J. J., Van de Vondel, S., Meysman, F. J. R., Cucchiaro, S., Tarolli, P., Shi, P., Six, J., Brown, A. G., van Wesemael, B., & Van Oost, K. (2023). Quantifying soil properties relevant to soil organic carbon biogeochemical cycles by infrared spectroscopy: The importance of compositional data analysis. Soil and Tillage Research 231 , 105718. https://doi.org/10.1016/j.still.2023.105718

Zhou, Y., Chen, S., Hu, B., Ji, W., Li, S., Hong, Y., Xu, H., Wang, N., Xue, J., Zhang, X., Xiao, Y., & Shi, Z. (2022). Global Soil Salinity Prediction by Open Soil Vis-NIR Spectral Library. Remote Sensing, 14(21), 5627. https://doi.org/10.3390/rs14215627

SUELOS ECUATORIALES

Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo

https://doi.org/10.47864/se552025p7686

Fertilización Integrada en el Cultivo del Arroz: Una Alternativa Sostenible y Competitiva

Integrated Fertilization in Rice Cultivation: A Sustainable and Competitive Alternative

Luis Armando Castilla Lozano[1*]✉, Hayder Mauricio Ortiz[2] , Yeimy Carolina Tirado[3]

[1*] Fedearroz - Fondo Nacional Arroz, Colombia.

Vol. 55 (1 y 2) de 2025 | pp: 76-86 | ISSN 0562-5351 E-ISSN 2665-6558 | REC.: 09/06/2026 - ACEP.: 17/07/2026

RESUMEN

El cultivo del arroz es una de las principales actividades económicas del departamento del Tolima. La fertilización es una de las prácticas agronómicas que más impacto tienen sobre el rendimiento, los costos de producción y la emisión de gases de efecto invernadero. En la finca Ventaquemada ubicada en el municipio de Alvarado – Tolima, se desarrolló un ensayo cuyo objetivo fue evaluar el impacto de la fertilización integrada en el cultivo del arroz. Los tratamientos evaluados fueron T1: Fertilización inorgánica o testigo, T2: Biofertilización + fertilización inorgánica y T3: Biofertilización + Fertilización orgánica e inorgánica. Se evaluaron las variables de rendimiento, costos de producción por hectárea y la eficiencia agronómica. El tratamiento con Biofertilización + Fertilización orgánica e inorgánica presentó los valores más altos en rendimiento. Sin embargo, el tratamiento Biofertilización + fertilización inorgánica tuvo la mayor rentabilidad y eficiencia agronómica. El uso combinado de biofertilizantes y fertilizantes orgánico-minerales en los planes de fertilización para el cultivo del arroz se presenta como una alternativa optima en la nutrición del cultivo del arroz. Es esencial que el manejo de este tipo de alternativas, como los biofertilizantes y fertilización orgánica, vaya de la mano con una gestión integrada de nutrientes.

Palabras clave: Fertilización, Biofertilización, Fertilización Orgánica, Productividad, Eficiencia.

ABSTRACT

Rice cultivation is one of the main economic activities in the department of Tolima. Fertilization is one of the agronomic practices with the greatest impact on yield, production costs, and greenhouse gas emissions. A trial was conducted at the Ventaquemada farm, located in the municipality of Alvarado, Tolima, to evaluate the impact of integrated fertilization on rice cultivation. The treatments evaluated were T1: Inorganic fertilization (control), T2: Biofertilization + inorganic fertilization, and T3: Biofertilization + organic and inorganic fertilization. Yield, production costs per hectare, and agronomic efficiency were evaluated. The treatment with biofertilization + organic and inorganic fertilization showed the highest yield. However, the treatment with biofertilization + inorganic fertilization had the highest profitability and agronomic efficiency. The combined use of biofertilizers and organic-mineral fertilizers in rice cultivation plans presents itself as an optimal alternative for rice crop nutrition. It is essential that the management of these alternatives, such as biofertilizers and organic fertilization, goes hand in hand with integrated nutrient management.

Keywords: Fertilization, Biofertilization, Organic Fertilization, Productivity, Efficiency.

INTRODUCCIÓN

El arroz es un cultivo de enorme importancia a nivel mundial, tanto por su valor nutricional como por su impacto económico y social. Según la FAO, para más de la mitad de la población mundial, el arroz constituye una fuente esencial de nutrientes y calorías en la dieta diaria, proporcionando alrededor del 20% del suministro de energía alimentaria global (*Troncoso & Sepúlveda, 2019*). En Colombia, el arroz ocupa el tercer lugar en importancia después del café y el maíz. Según datos de DANE y FEDEARROZ, en 2023 se sembraron aproximadamente 568.455 hectáreas.

En algunos municipios productores de arroz, este cultivo representa hasta el 80% de los ingresos familiares. A nivel nacional, alrededor de 400 mil familias dependen de este cultivo. El consumo per cápita de arroz en la última década ha promediado los 40 kilos (*MDR, 2020*). Estas cifras destacan la relevancia del arroz tanto a nivel mundial como en Colombia, subrayando la necesidad de mantener su sostenibilidad y productividad. Sin embargo, el sector arrocero enfrenta una serie de desafíos que afectan su competitividad y ponen en riesgo tanto los empleos rurales como la seguridad alimentaria de los colombianos. Entre los desafíos se encuentra el aumento de los costos de los insumos, especialmente los fertilizantes inorgánicos. Durante el año 2022 los precios del sulfato de amonio, urea y DAP aumentaron significativamente, con incremento hasta del 200%, 267% y 102%, respectivamente, con respecto al 2021 (*AMIS, 2021*).

La alta dependencia de Colombia de fertilizantes químicos importados ha contribuido a este aumento de costos. Esto se refleja en el porcentaje de participación de la fertilización dentro de la estructura de costos de producción, que pasó del 21% en 2020 al 35% en 2021B y al 45% en el 2026. Esta situación ha generado un aumento considerable en los costos de producción por hectárea.

Además, la baja eficiencia agronómica de los nutrientes aplicados en el cultivo agrava esta problemática. Según la FAO, la eficiencia de la fertilización es baja para nutrientes como el nitrógeno, fósforo, potasio, calcio y magnesio, lo que significa que una gran parte de los nutrientes aplicados se pierden en el suelo o no son absorbidos por las plantas.

Ante estos desafíos, es crucial implementar estrategias que aumenten la eficiencia de la fertilización a través del manejo integrado del cultivo y del suelo. Esto incluye la combinación de fertilizantes orgánicos, inorgánicos y biofertilizantes, así como la consideración de factores como las condiciones climáticas, las características del suelo, la fenología del cultivo y los requerimientos nutricionales de la variedad a sembrar.

Para abordar estas problemáticas y demostrar a los agricultores las estrategias técnicas disponibles, se propone la realización de un trabajo investigación, sobre el manejo integrado de nutrientes, con el objetivo de implementar alternativas que involucren las interacciones orgánicas – inorgánica – biológica para el manejo integral de la nutrición del cultivo del arroz. y su impacto en el rendimiento y la rentabilidad. Los resultados de esta investigación realizada por FEDEARROZ - FNA serán fundamentales para orientar acciones que mejoren la sostenibilidad y productividad del sector arrocero en Colombia.

MATERIALES Y MÉTODOS

El ensayo se llevó a cabo durante el segundo semestre de 2022, en un lote comercial de la finca Ventaquemada, ubicado en el municipio de Alvarado, Tolima, con coordenadas

geográficas de latitud 4°30’57.9”N y longitud 74°58’21.3”W, a una altitud de 513 metros sobre el nivel del mar (m.s.n.m).

Identificación de ambientes

Para la identificación de los ambientes en el lote experimental, se hizo a través del procesamiento de imágenes satelitales (Sentinel 2) dentro de un periodo de 10 años aproximadamente, tomando aquellas imágenes que tenían buena resolución y se encontraban dentro del rango de siembra hasta cosecha en los años en que se sembró el lote. De esta manera, se identificaron áreas con diferencias en los valores de NDVI (Índice normalizado diferenciado de vegetación).

Caracterización de ambientes

Posteriormente, se llevó a cabo una caracterización química del suelo mediante un análisis de fertilidad completa en cada ambiente. Además, se realizaron mediciones de compactación del suelo cada 5 cm utilizando un penetrómetro de bolsillo, y se evaluó el contenido de humedad volumétrica del suelo en los primeros 12 cm de profundidad utilizando un TDR (Reflectometría en el Dominio del Tiempo). En el aspecto biológico, se tomaron muestras a una profundidad de 10 cm para determinar los grupos funcionales y las cantidades presentes en el suelo.

Con base en los resultados de los diagnósticos, se diseñó un plan de manejo agronómico bajo un enfoque holístico del cultivo del arroz. Este plan incluyó la incorporación de coproductos orgánicos de cosecha (Biomasa residual de cosecha), seguido de labores de preparación y adecuación del suelo. Se seleccionó la variedad de arroz Fedearroz Ibis CL, con una densidad de siembra de 130 kg/ha, y su manejo nutricional se determinó utilizando la plataforma SIFA WEB (Sistema Integrado de Fertilización Arrocera), ajustado según las condiciones agroecológicas de la zona.

Diseño experimental

El ensayo se estableció con un diseño experimental en franjas con cinco repeticiones, cada franja cuenta con un área de 10.000 m². Los tratamientos evaluados incluyeron:

Fertilización

El diseño del plan de fertilización se elaboró utilizando como referencia la plataforma SIFAWeb de Fedearroz – FNA. Esta herramienta genera una recomendación ajustada a los requerimientos nutricionales del lote evaluado, integrando los resultados del análisis químico del suelo, variables físicas como la textura y la densidad aparente, los requerimientos nutricionales de la variedad, su potencial productivo y la influencia de las condiciones climáticas sobre la disponibilidad y eficiencia de los nutrientes.

Para este caso, el plan de fertilización generado por la plataforma SIFAWeb tuvo en cuenta un rendimiento promedio de 9 t/ha para la variedad Fedearroz Ibis CL en la Finca Ventaquemada. Este dato es fundamental, dado que la plataforma lo utiliza como referencia para ajustar la recomendación final según los requerimientos específicos de la variedad. Adicionalmente, se ingresó la información de la fecha de siembra y la emergencia estimada del cultivo, con el fin de incorporar el histórico climático de la zona y proyectar el comportamiento del clima durante los cuatro meses posteriores, con base en los pronósticos disponibles.

Tratamiento 1. Nutrición basada únicamente en fertilización inorgánica (Fert.Inorg o Testigo.), utilizando fuentes como:

- **Nitrógeno:** Urea (46–0–0) y sulfato de amonio (21–0–0–24 S).
- **Fósforo:** Fosfato monoamónico (MAP, 12–52–0).

Suelos Ecuatoriales 55 (1 y 2):76-86. https://doi.org/10.47864/se552025p7686

- **Potasio:** Cloruro de potasio (KCl, 0-0-60)
- **Micronutrientes:** Sulfato de Zinc (0-0-0-25 Zn)

En total se realizaron cinco fraccionamientos durante el ciclo de cultivo y los fertilizantes fueron aplicados al voleo.

Tratamiento 2. Nutrición basada en fertilización inorgánica combinada con biofertilizantes (Fert.Inorg. + BioF),

- Solubilizadores de fósforo aplicados a la semilla (*Penicillium janthinellum*)
- Aplicación de bacterias fijadoras de nitrógeno y promotoras del crecimiento vegetal a los 15 días de emergencia (*Azotobacter chroococum y Azospirillum sp*.).
- Aplicación de fuentes orgánico-minerales con base en humus de lombriz en forma foliar a los 15, 30 y 45 días después de la emergencia.

En total se realizaron cinco fraccionamientos durante el ciclo de cultivo y los fertilizantes (Inorgánicos) fueron aplicados al voleo.

Tratamiento 3. Nutrición basada en fertilización inorgánica, sustancias orgánico-minerales, complementada con fertilizantes edáficos con fracción mineral y orgánica en su composición. (Fert.Inorg. + BioF + Fert.Org.).

- Solubilizadores de fósforo aplicados a la semilla (*Penicillium janthinellum*)
- Aplicación de bacterias fijadoras de nitrógeno y promotoras del crecimiento vegetal a los 15 días de emergencia (*Azotobacter chroococum y Azospirillum sp*.).
- Aplicación de fuentes orgánico-minerales con base en humus de lombriz en forma foliar a los 15, 30 y 45 días después de la emergencia.
- **Nitrogênio:** Fertilizante orgânico-Mineral 26-0-0-3(S)
- **Fósforo:** Fertilizante orgánico -Mineral 10-30-10, 15-15-15
- **Potasio:** Fertilizante orgánico -Mineral 15-15-15

En total se realizaron cinco fraccionamientos durante el ciclo de cultivo y los fertilizantes inorgánicos como los orgánicos fueron aplicados al voleo de forma conjunta.

Variables evaluadas

Este enfoque posibilitó la evaluación del impacto de diversas estrategias de nutrición en el cultivo de arroz, adaptadas a las condiciones particulares de la finca. Se analizó el rendimiento por hectárea de cada tratamiento, así como el costo de la fertilización y de producción de paddy verde por hectárea. Además, se examinó la eficiencia agronómica por nutriente (N, P, K). Este método de evaluación integral permitió obtener una visión completa y detallada de los efectos de cada estrategia de nutrición y manejo, lo que facilita la toma de decisiones para optimizar la producción de arroz de manera sostenible y rentable.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los tratamientos evaluados se establecieron en el ambiente verde, tomando en consideración el diagnóstico químico y microbiológico del suelo. A partir de los análisis, se diseñaron planes nutricionales específicos, los cuales fueron elaborados con el apoyo de la plataforma SIFA WEB (Figura 3 y 4). Este enfoque permitió personalizar los planes de fertilización para cada tratamiento, asegurando que se proporcionaran los nutrientes necesarios de manera óptima para promover el crecimiento y desarrollo de la planta de arroz.

Diagnóstico

Análisis de los ambientes y de la retención de humedad en el suelo

De acuerdo con el diagnóstico previo, apoyado con imágenes de NDVI del lote a trabajar, identificamos tres ambientes (Fig.1.B). Las zonas de color verde corresponden a valores de NDVI que van desde 0,80 a 0,83 y abarcan 3,4 ha, lo cual indica un mejor comportamiento de las plantas de arroz en esta zona. Las de color amarillo representa valores 0,78 a 0,79, mientras que el anaranjado muestra valores entre 0,70 a 0,77 y constituyen 2,80 ha.

Adicionalmente, el muestreo para determinar el contenido de humedad volumétrica en el suelo revela que los sectores de color rojo son áreas con menor retención de humedad, mientras que los colores verdes y azules representan sectores con mayor retención de humedad (Fig.1.C). Por lo tanto, al realizar un análisis, se observa una correlación entre las áreas de menor retención de humedad en el suelo con los ambientes de menor NDVI (amarillo y anaranjado). De manera que el bajo desarrollo de las plantas de arroz en esos sectores se debe a problemas hídricos en el suelo.

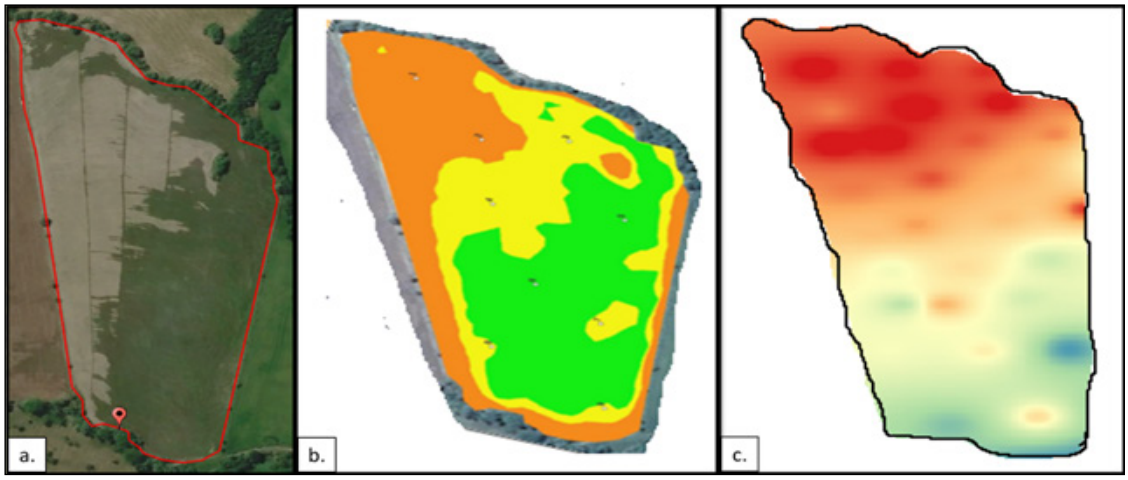


Figura 1. Lote 4, Finca Ventaquemada. **a**. Mapa satelital**. b.** Mapa NDVI. **c.** Mapa de humedad volumétrica.

Análisis de la resistencia a la penetración del suelo por ambiente

El diagnóstico de resistencia a la penetración para cada ambiente indicó que no hay problemas de compactación en los primeros 15 cm de profundidad del suelo (Tabla 1). Los valores obtenidos están dentro del rango recomendado para el cultivo de arroz (menor a 2,5 kgF/cm^2). Es importante destacar que la evaluación se realizó bajo la adecuada condición de humedad de suelo (Capacidad de campo).

Profundidad	Ambiente verde		Ambiente amarillo-anaranjado	
	Punto 1 (Kg-f·cm^{-2})	Punto 2 (Kg-f·cm^{-2})	Punto 3 (Kg-f·cm^{-2})	Punto 4 (Kg-f·cm^{-2})
5 cm	1	1.5	1.5	2
10 cm	1.5	0.5	2	0.5
15 cm	1	1.5	1	2

Tabla 1. Evaluación de la resistencia a la penetración (compactación) a diferentes profundidades del perfil del suelo en cada uno de los ambientes de NDVI.

Suelos Ecuatoriales 55 (1 y 2):76-86. https://doi.org/10.47864/se552025p7686

Análisis químico del suelo por ambiente

La fertilidad en cada uno de los ambientes presenta diferencias según el análisis de suelo (Figura 2 y 3). Se observa un pH más alto en el ambiente amarillo-anaranjado, con una alta concentración de calcio (Ca). En cuanto a las bases de cambio, el potasio (K) y el magnesio (Mg), no se encontraron diferencias, al igual que para el fósforo (P) y el azufre (S). Sin embargo, en lo que respecta a los elementos menores, el ambiente verde muestra una mayor concentración en el suelo, con la excepción del boro (B).

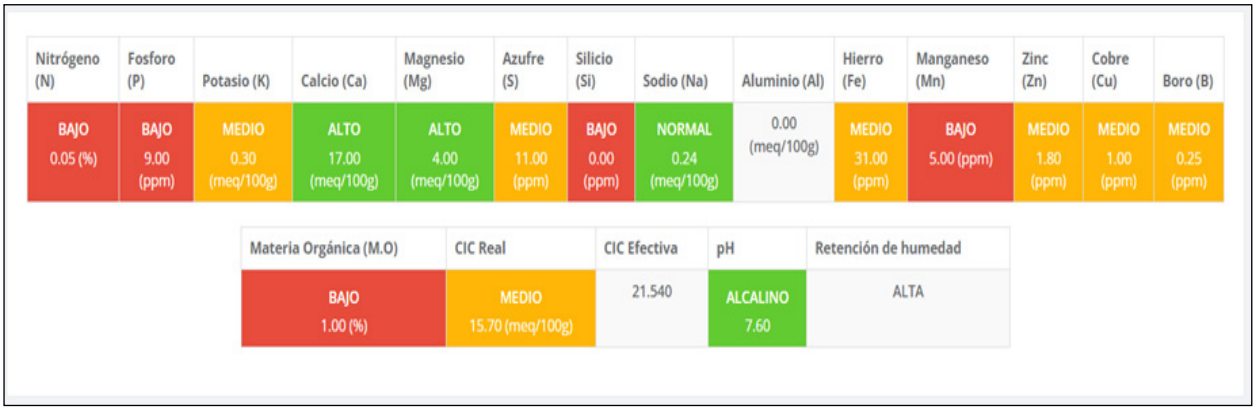


Figura 2. Resultados e interpretación del análisis de suelos del lote 4 ambiente verde de la finca Ventaquemada, Alvarado (Tolima) a partir de la plataforma SIFA Web.

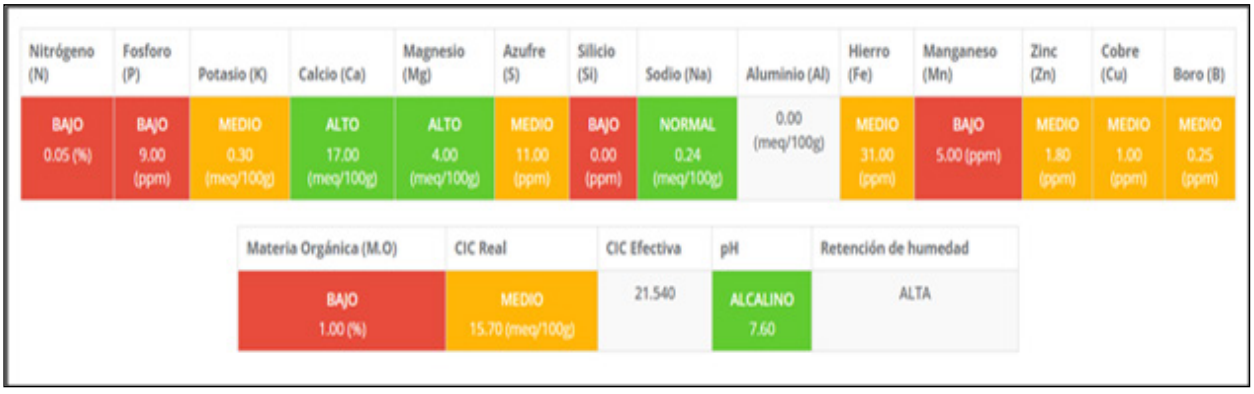


Figura 3. Resultados e interpretación del análisis de suelos del lote 4 ambiente amarillo-anaranjado de la finca Ventaquemada, Alvarado (Tolima) a partir de la plataforma SIFA Web.

Análisis microbiológico del suelo por ambiente

En términos generales, se presentaron bajas poblaciones de microorganismos en los dos ambientes (Tabla 2), registrando ausencia de fijadores de nitrógeno. Adicionalmente, en el ambiente amarillo-anaranjado no se registró presencia de solubilizadores de fósforo.

De acuerdo con los resultados del diagnóstico químico, físico y microbiológico del suelo de cada ambiente, se definieron algunas prácticas de manejo agronómico: se realizó una preparación convencional con dos pases de rastra, más un pase de Land plane y caballones con láser para todo el lote. En el caso de las áreas de menor retención de humedad (Ambiente amarillo-anaranjado), se decidió implementar riego por múltiples entradas (MIRI) para poder contrarrestar la perdida de humedad con riego dirigido a esos sectores y con mayor frecuencia.

Tabla 2. Contenido poblaciones de grupos funcionales de microorganismos del suelo en cada uno de los ambientes de la finca Ventaquemada, Alvarado (Tolima).

Microorganismos	Ambiente verde (UFC)	Ambiente amarillo-anaranjado (UFC)
Amilolíticos	2.40E+04	4.00E+05
Proteolíticos	1.30E+05	2.00E+05
Celulolíticos	2.40E+04	1.80E+04
Fijadores de nitrógeno	0.00E+00	0.00E+00
Solubilizadores de fósforo	1.20E+04	0.00E+00

Cantidad de unidades de nutrientes por tratamiento

El tratamiento de BioF+ Fert.Inorg. tuvo las siguientes unidades: 140 kg/ha N, 34 g/ha kP_2O_5 y 45 kg/ha K_2O y se aplicó un total de 12 bultos de fertilizante por hectárea. En el caso de la BioF + Fert.Org + Fert.Inorg., el número de unidades correspondió a: 190 kg/ha N, 93 kg/ha P_2O_5 y 83 kg/ha K_2O con un total de 19 bultos. Para el tratamiento testigo se aplicaron 202 kg/ha N, 56 kg/ha P_2O_5 y 60 kg/ha K_2O, teniendo un aumento entre un 6% y un 30% más de nitrógeno que los otros tratamientos (Figura 4).

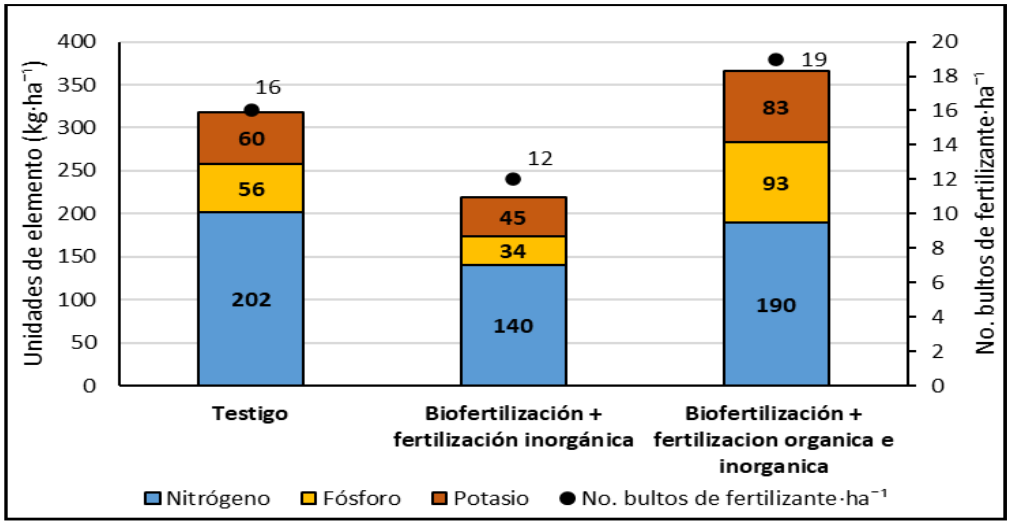


Figura 4. Número de unidades (kg/ha) de macroelementos y de bultos de fertilizantes aplicados en cada uno de los tratamientos evaluados durante el ciclo cultivo en la finca Ventaquemada, Alvarado (Tolima).

El tratamiento con BioF+ Fert.Inorg se encontró una reducción en el número de unidades de nutrientes y, por ende, cantidad de bultos de fertilizante por hectárea. De acuerdo con Adesemoye & Kloepper, (2009) los microorganismos pueden optimizar el ciclaje de nutrientes en el suelo, con lo cual aumenta su disponibilidad y mejora la nutrición de las plantas; con este enfoque es posible reducir la fertilización mineral de síntesis.

Por otra parte, los biofertilizantes pueden inducir el crecimiento de la planta por medio de mecanismos como la producción de fitohormonas (auxinas, ácido abscísico, citocininas, etileno y giberelinas), la solubilización de fosfatos, la producción de sideróforos y la inducción de la resistencia sistémica intrínseca de la planta al estrés biótico, entre otros (Malusá & Vassilev, 2014; Saad et al., 2020)

Suelos Ecuatoriales 55 (1 y 2):76-86. https://doi.org/10.47864/se552025p7686

Costo de la fertilizacion por tratamiento

Durante la campaña del semestre B de 2022, momento en que se llevó a cabo el trabajo de investigación, los precios de los fertilizantes se situaban en niveles que superaban el 100 % en comparación con los precios de 2024A. Sin embargo, según los resultados obtenidos, el costo del rubro de fertilización, en el caso de la BioF+ Fert.Inorg, disminuyó en un 35 % en comparación con el testigo que utilizaba únicamente la fertilización inorgánica. Por otro lado, el tratamiento que involucra BioF + Fert.Org + Fert.Inorg. tuvo un costo similar al testigo (Figura 5).

Esta reducción en el costo de la fertilización al utilizar biofertilizantes junto con fertilizantes inorgánicos representa un beneficio económico significativo para los agricultores, especialmente en un contexto donde los precios de los fertilizantes han aumentado considerablemente.

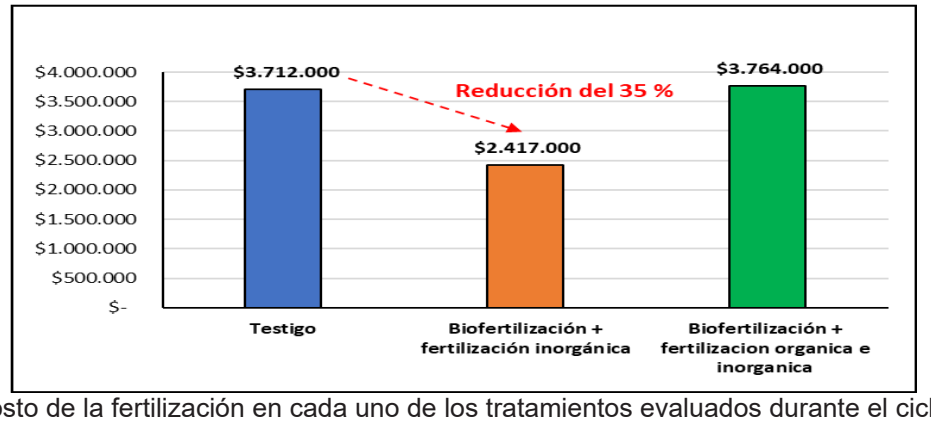


Figura 5. Costo de la fertilización en cada uno de los tratamientos evaluados durante el ciclo cultivo en la finca Ventaquemada, Alvarado (Tolima).

Rendimiento de los tratamientos evaluados

El rendimiento del tratamiento con BioF + Fert.Org + Fert.Inorg mostró un aumento del 17% en productividad en comparación con el tratamiento que utilizaba únicamente fuentes inorgánicas (Figura 6). Del mismo modo, el uso de biofertilizantes combinado con fuentes inorgánicas resultó en un incremento del 12%. Estos resultados son muy significativos, especialmente considerando la reducción en el número de unidades de nitrógeno que se tuvo en los tratamientos. La aplicación de una buena fuente de materia orgánica compostada en mezcla con fertilizantes inorgánicos origina una sinergia importante que favorece el rendimiento del arroz en diferentes tipos de suelos. (Castilla, 2016).

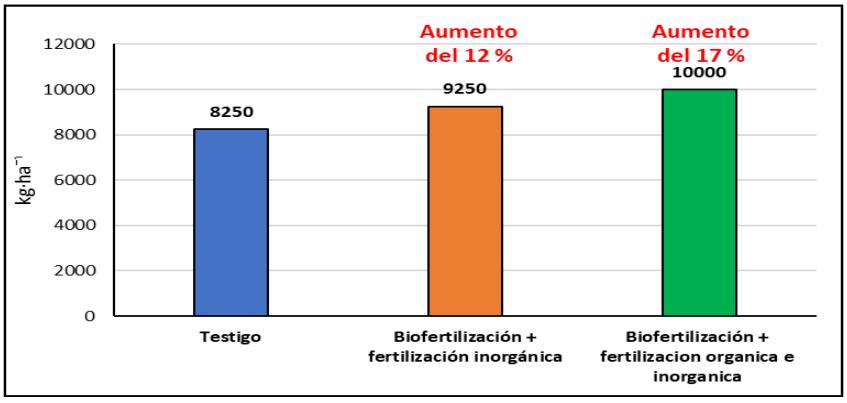


Figura 6. Rendimiento paddy verde, de la variedad Fedearroz Ibis CL, sometida a los tratamientos de fertilización. Alvarado, Tolima.

La implementación de las alternativas integradas en los planes de nutrición no solo tiene un impacto positivo en la competitividad de los agricultores arroceros, sino que también contribuye a la sostenibilidad ambiental al reducir la dependencia de fertilizantes químicos y promover prácticas agrícolas más amigables con el medio ambiente. Estos hallazgos resaltan la importancia de explorar y adoptar enfoques más holísticos y sostenibles en la agricultura, que puedan mejorar la productividad a la vez que reducen los impactos negativos en el medio ambiente y en la economía de los agricultores.Principio del formulario

Eficiencia agronómica por nutriente

La eficiencia agronómica hace referencia a las unidades de incremento en rendimiento por unidad de nutriente aplicado. En este estudio, se encontró que la eficiencia agronómica fue mayor en el tratamiento de BioF+ Fert.Inorg, lo que indica que fue más eficiente en el uso del nitrógeno, fósforo y potasio (Tabla 3). Por otro lado, el tratamiento que integraba BioF + Fert.Org + Fert.Inorg también mostró una mayor eficiencia agronómica en términos de nitrógeno en comparación con el testigo. Sin embargo, en lo que respecta al fósforo y al potasio, la eficiencia agronómica no fue la mejor en comparación con el número de unidades aplicadas. Esto sugiere que, aunque este tratamiento puede ser eficiente en términos de nitrógeno, puede haber margen para optimizar la eficiencia en el uso de fósforo y potasio en futuras investigaciones o prácticas agrícolas.

Tabla 3. Comportamiento de la eficiencia agronómica de los macronutrientes en los tratamientos de fertilización en la finca Ventaquemada, Alvarado (Tolima).

					Eficiencia agronómica		
Tratamiento	**Rendimiento (kg/ha)**	**Nitrógeno (kg/ha)**	**Fosforo (Kg/ha)**	**Potasio (kg/ha)**	**N (kg/ha)**	**P (kg/ha)**	**K (kg/ha)**
Testigo	8250	202	56	60	41	147	138
Biofert. + Ferti. inorgánica	9250	140	34	45	66	272	206
Biofert. + Ferti. orgánica e inorgânica	10000	190	93	83	52	107	120

Fosforo: P_2O_5 Potasio: K_2O

Costo por tonelada.

El costo por tonelada de implementar Biofertilización junto con fertilización inorgánica se redujo en un 22 % al utilizar únicamente fertilización inorgánica, y en un 6 % en comparación con el enfoque que incorporaba todas las fuentes de fertilizantes disponibles. Esta diferencia en los costos se traduce en un impacto positivo en la rentabilidad del cultivo del arroz (figura 7).

Parámetro	**Fertilización Convencional Agricultor**	**Fert. Inorgánica + Bio. Fert**	**Fert. Inorgánica + Bio.Fert + Fert. Orgánica**
Total, costos ($/ha)	$ 9.723.985	$ 8.428.977	$ 9.775.985
Rendimiento (t/ha)	8,2	9,2	10
Costo $/t	$ 1.185.851	$ 916.240	$ 977.598

Figura 7. Análisis económico de los tratamientos de fertilización en evaluación, para la variedad Fedearroz Ibis CI.

Suelos Ecuatoriales 55 (1 y 2):76-86. https://doi.org/10.47864/se552025p7686

CONCLUSIONES

El uso combinado de biofertilizantes y fertilizantes orgánico-minerales en los planes de fertilización para el cultivo del arroz se presenta como una alternativa optima en la nutrición vegetal. Este enfoque ha demostrado aumentar el rendimiento en un 12 % y un 17 %, respectivamente, en comparación con el uso exclusivo de fertilizantes inorgánicos. Esta práctica se destaca desde el punto de vista de la rentabilidad y de la producción sostenible.

La implementación de planes nutricionales que integran fuentes orgánicas, inorgánicas y biológicas resulta en una reducción significativa en la cantidad de nutrientes aplicados, lo que a su vez disminuye los costos asociados con el rubro de fertilización. En particular, se observa una reducción del 6 % al 30 % en las unidades de nitrógeno, un descenso del 39 % en el fósforo y una disminución del 25 % en el potasio.

Estos resultados indican una optimización en la eficiencia de los nutrientes, donde se logra maximizar su aprovechamiento por parte de las plantas mediante la combinación de diferentes fuentes de nutrientes. La incorporación de fuentes orgánicas, inorgánicas y biológicas en los planes de nutrición no solo permite reducir la cantidad total de fertilizantes aplicados, sino que también promueve la sostenibilidad al disminuir la dependencia de los fertilizantes químicos y mejorar la salud del suelo.

RECOMENDACIONES

El uso de alternativas como los biofertilizantes en el cultivo de arroz requiere un enfoque cuidadoso para garantizar su eficacia. Es fundamental proporcionar las condiciones óptimas de establecimiento y determinar las dosis y momentos adecuados de aplicación. Esto asegura el establecimiento efectivo de los microorganismos en el suelo y permite observar sus efectos en el cultivo del arroz.

Las reducciones en la cantidad de unidades de fertilizante pueden variar considerablemente según el tipo de suelo, sistema de siembra y la variedad utilizada en el cultivo del arroz. Cada material tiene su propia capacidad de extracción de nutrientes, la cual está influenciada por una serie de factores, como las condiciones químicas, físicas y biológicas del suelo, así como las condiciones ambientales.

Por lo tanto, es esencial que el manejo de este tipo de alternativas, como los biofertilizantes y fertilización orgánica, vaya de la mano con una gestión integrada de nutrientes. Esto implica llevar a cabo un diagnóstico detallado del suelo y una planificación cuidadosa de las labores agronómicas en colaboración con un asistente técnico calificado. Este enfoque colaborativo permite adaptar las estrategias de fertilización a las condiciones específicas de cada área de cultivo, maximizando así la eficiencia en el uso de los nutrientes y optimizando los resultados agronómicos.

BIBLIOGRAFÍA

Adesemoye, A. O., & Kloepper, J. W. (2009). Plant–microbes interactions in enhanced fertilizer-use efficiency. Applied Microbiology and Biotechnology, 85(1), 1-12. https://doi.org/10.1007/s00253-009-2196-0.

Castilla, L. A. 2016. Manejo integrado de la materia orgánica en el cultivo del arroz. Revista Arroz. Fedearroz. Vol 64, N° 522: 18 – 24.

DANE-FEDEARROZ. (2023). Encuesta Nacional de Arroz Mecanizado (ENAM). DANE.GOV.COhttps://www.dane.gov.co/files/investigaciones/boletines/arroz/bol_arroz_IIsem20.pdf.

Malusá, E., & Vassilev, N. (2014). A contribution to set a legal framework for biofertilisers. Applied Microbiology and Biotechnology, 98(15), 6.599-6.607. https:// doi.org/10.1007/ s00253-014-5828-y.

Ministerio de Desarrollo Rural (MDR). (2020). *Informe sobre el consumo de arroz en la última década*. https://www.minagricultura.gov.co/Normatividad/Resoluciones/RESOLUCI%C3%93N%20NO.%20000077%20DE%202021.pdf.

R.C. Chaudhary, J.S. Nanda, & D.V. Tran. (2003). *FAO.* Recuperado el 2024, de https://www.fao.org/3/Y2778S/y2778s00.htm#Contents.

Sistema de Información del Mercado Agrícola (AMIS). (2021). *Informe sobre el aumento de los costos de los fertilizantes inorgánicos en el sector arrocero*. https://opsaa.iica.int/resource-260-amis:-sistema-de-informacion-de-los-mercados-agricolas.

Troncoso-Sepúlveda, R., (2019). Transmisión de los precios del arroz en Colombia y el mundo. Lecturas de Economía, (91), 151-179. https://doi.org/10.17533/udea.le.n91a05.

SUELOS ECUATORIALES

Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo

https://doi.org/10.47864/se552025p8798

Huella hídrica y sostenibilidad del cultivo de arroz en el distrito de riego ASOJUNCAL

Water footprint and sustainability of rice cultivation in the ASOJUNCAL irrigation district

Rafael Ricardo Davidson Montero[1*]✉, Armando Torrente Trujillo[2]✉, Nilver Tovar Ospina[3]✉, Angela Goretty García[4]✉

[1*] Ing. Civil, M.Sc. Ing. y Gestión Ambiental.
[2] Dr. Ciencias Agrarias
[3] M.Sc Ingeniería y Gestión Ambiental
[4] Ing. Química, M.Sc.
Universidad Surcolombiana. Programa de Maestría en Ingeniería y Gestión Ambiental.

Vol. 55 (1 y 2) de 2025 | pp: 87-98 | ISSN 0562-5351 E-ISSN 2665-6558 | REC.: 10/06/2026 - ACEP.: 14/07/2026

RESUMEN

Se estima la huella hídrica del cultivo de arroz de la finca Himalaya, un área de 13.5 ha del Distrito de Adecuación de Tierras de Mediana Escala El Juncal – ASOJUNCAL, en el municipio de Palermo (Huila, Colombia). Se sigue la metodología propuesta por la Red de la Huella Hídrica (WFN, Water Footprint Network), y se utiliza el software de uso libre CROPWAT 8.0 para calcular los requerimientos de agua a partir de datos edáficos de la zona. De esta manera, se logra la estimación de las huellas hídricas verde, azul y gris del ciclo productivo del cultivo de arroz. De acuerdo con los resultados, se estima que la huella hídrica total promedia es de 1.402 m3/t por mes, representada con el 19% de agua verde, 71% de agua azul y 10% de agua gris. Por su parte, los análisis revelan que existe una apropiación alta de agua azul que genera pérdidas económicas en gastos de operación al agricultor y; una baja apropiación de agua verde aprovechada por el cultivo, mientras que los niveles de agua gris son relativamente bajos. Finalmente, se proponen estrategias de respuesta sostenibles que contribuyen a minimizar la huella hídrica del cultivo de arroz promoviendo el uso eficiente de los recursos.

Palabras clave: Alternativas sostenibles, Huella hídrica; eficiencia del agua, riego de arroz, ASOJUNCAL.

ABSTRACT

The water footprint of rice cultivation at the Himalaya farm, a 13.5 ha area within the El Juncal Medium-Scale Land Improvement District – ASOJUNCAL, in the municipality of Palermo (Huila, Colombia), was estimated. The methodology proposed by the Water Footprint Network (WFN) was followed, and the open-source software CROPWAT 8.0 was used to calculate water requirements based on soil data from the area. This allowed for the estimation of the green, blue, and grey water footprints of the rice production cycle. According to the results, the average total water footprint is estimated at 1,402 m³/t per month, comprised of 19% green water, 71% blue water, and 10% grey water. The analyses reveal a high appropriation of blue water, resulting in economic losses for farmers in operating expenses, and a low appropriation of green water utilized by the crop, while gray water levels are relatively low. Finally, sustainable response strategies are proposed to minimize the water footprint of rice cultivation by promoting the efficient use of resources.

Keywords: Sustainable alternatives, Water footprint, Water efficiency, Rice Irrigation, ASOJUNCAL.

INTRODUCCION

El crecimiento desmesurado de la población en los últimos años ha llevado a los seres humanos a ejercer una demanda a escala exponencial sobre los recursos naturales. Según United Nations 2024, se estima que el recurso hídrico demandado a nivel mundial en el sector de la agricultura es de aproximadamente el 70% de toda el agua consumida en el planeta Se prevé que, para el año 2050, la cantidad de agua necesaria para producir los alimentos, fibras y biocombustibles se incrementen hasta en un 60% en países desarrollados y en un 100% o más en los países en vías de desarrollo.
Adicionalmente, el cambio climático está contribuyendo a ocasionar condiciones meteorológicas extremas que privan a millones de personas de la accesibilidad a los recursos básicos para su subsistencia (OMM, 2025). La FAO (2025) revela que el 80% de las personas afectadas son comunidades de bajos recursos, que típicamente viven en áreas rurales y dependen de actividades como agricultura, pesca y silvicultura para su supervivencia.

En el contexto del sector agrícola en Colombia, se estima que la competencia por los recursos naturales aumente en el futuro y que cada vez sea mayor el número de impactos de origen antrópico sobre el agua. Por consiguiente, para fortalecer el sector agrícola es necesario hacer inversiones en proyectos destinados a la mejora en cuanto a gestión del suelo, del agua y de la calidad de las semillas (Banco Mundial, 2022). En otras palabras, si no se adopta una política de conciencia sostenible en la agricultura, no se podrá cumplir el objetivo de una economía eficiente en función de los recursos naturales, ni construir un futuro sostenible (FAO, 2025). Además, se requiere la integración de políticas ambientalmente sostenibles, socialmente equitativas y económicamente eficientes (Hoekstra, Booij y Hunink, 2012). Estas coyunturas conllevarían al desarrollo de metodologías para evaluar la huella hídrica con la finalidad de conocer los impactos que tiene la producción agrícola de bienes en los recursos hídricos (Chapagain y Tickner, 2012).

Según CGIAR (2015), la huella hídrica de un cultivo o de un árbol se refiere al volumen de agua utilizado por el cultivo (m^3/ha) dividido entre su rendimiento (t/ha) y está compuesta por la sumatoria de la huella hídrica verde, azul y gris, y se expresa en m^3/t para este sector. La huella hídrica verde se refiere a las precipitaciones que se almacena en la zona radicular del suelo y se evapora, transpira o se incorpora dentro de un proceso de producción, la huella hídrica azul es un indicador del uso consuntivo del agua superficial o subterránea que se evapora o incorpora en procesos de producción (WFN, 2009), mientras que la huella hídrica gris se define como la cantidad de agua que se requiere para asimilar la carga de contaminantes que se generan en un proceso de producción hasta alcanzar las concentraciones de calidad de agua definidas por la entidad ambiental correspondiente.

En consonancia con lo anterior, la presente investigación estima la huella hídrica del cultivo de arroz en el Distrito de Adecuación de Tierras de Mediana Escala ASOJUNCAL en el municipio de Palermo (Huila), siguiendo la metodología propuesta por la red internacional de la Huella Hídrica (Water Footprint Network, WFN), y se utiliza el *software* de uso libre CROPWAT 8.0 desarrollado por la FAO para calcular los requerimientos de agua verde y azul en función de los datos edáficos del área de estudio, igualmente se estima la huella hídrica gris para la carga contaminante causada por la aplicación del fertilizante nitrógeno (N). Para finalizar, se realiza un análisis de sostenibilidad ambiental, económica y social de la huella hídrica con el fin de proponer estrategias de mejora que

Suelos Ecuatoriales 55 (1 y 2): 87-98. https://doi.org/10.47864/se552025p8798

permitan un manejo sostenible del recurso hídrico.

MATERIALES Y METODOS

Diseño Metodológico

La evaluación de la huella hídrica del cultivo de arroz de la finca Himalaya, se basa en el "*manual para la medición de la huella hídrica"*, una guía de apoyo para la medición los estándares globales, en la que se evidencia cómo calcular las huellas hídricas para cultivos, procesos individuales, consumidores, áreas geográficamente delimitadas, naciones y empresas (Hoekstra et al., 2011), siguiendo cuatro fases: (1) definición de objetivos y alcance, (2) contabilidad de la huella hídrica, (3) análisis de sostenibilidad de la huella hídrica, (4) formulación de respuestas a la huella hídrica.

Fase I: Definición de objetivos y alcance
Esta fase consistió en realizar un diagnóstico e identificación de los diferentes factores que actúan en el cultivo de arroz con dos enfoques; uno de tipo cualitativo, cuya finalidad fue documentar la información base para la investigación, incluyendo los aspectos generales de la zona, localización geográfica, geología e información climatológica; y otra de tipo cuantitativo, donde se reconoció el predio en estudio, identificaron las zonas de protección ambiental, fuentes de abastecimiento y prácticas de cosecha.

Fase II: Contabilidad de la Huella Hídrica
La huella hídrica total de un proceso de cultivo (HHproc) es la suma de los componentes verde, azul y gris (Ecuación 1):

$$HHProc = HHverde + HHazul + HHgris \quad (1)$$

El componente verde en la huella hídrica del proceso de cultivo (HHproc, verde, m^3/t) (Ecuación 2), se calculó como el componente verde del uso de agua del cultivo (CWU_{verde}, m^3/ha) dividido entre el rendimiento del cultivo (Y, t/ha). El componente azul (HHproc azul, m^3/t) (Ecuación 3), se calculó de forma similar (Hoekstra et al., 2011):

$$HHprod, verde = \frac{CWUverde}{Y} \quad (2)$$

$$HHprod, azul = \frac{CWUazul}{Y} \quad (3)$$

Por su parte, el consumo de agua verde del cultivo (CWU verde, m^3/ha) (Ecuación 4), se calculó a partir de la acumulación de la evapotranspiración diaria (ET verde, mm/día) que corresponde al agua proveniente de las precipitaciones durante todo el crecimiento del cultivo (Hoekstra et al., 2011):

$$CWU\ verde = 10x \sum_{d=1}^{lgp} ET\ verde \quad (4)$$

El consumo de agua azul del cultivo (CWU azul, m^3/ha) (Ecuación 5), se calculó a partir de la acumulación de la evapotranspiración diaria (ET azul, mm/día) que corresponde a los requerimientos de riego, los cuales se obtuvieron mediante la diferencia entre las precipitaciones efectivas y la evapotranspiración del cultivo (Hoekstra et al., 2011):

$$CWU\ azul = 10x \sum_{d=1}^{lgp} ET\ azul \quad (5)$$

Para estimar de la evapotranspiración de agua verde y azul fue necesario emplear como herramienta de apoyo el software de uso libre CROPWAT 8.0. desarrollado por la FAO (2010), el cual utiliza el método de Penman-Monteith para determinar la evapotranspiración de los cultivos (ET), requerimientos de agua y riego con base en datos del clima, del cultivo y del suelo, así:

Clima/ETo: Los datos de temperatura máxima, mínima, humedad relativa, viento y radiación solar.

Precipitación: Precipitación mensual de los últimos 20 años.

Cultivo: Fecha de siembra y cosecha: 15/01/2023 – 13/06/2023; Coeficiente del cultivo (*Kc*) y fases de crecimiento: Inicio (1.05), Medio (1.20), Final (0.90); Etapas de desarrollo del cultivo: Inicio (30) días, Desarrollo (30) días, Medio (60) días, Final (30), Total de días (150) días; Profundidad radicular: 0.45 m; Fracción de agotamiento critico (*p*)*:* 0.20; Factor de respuesta de la productividad del cultivo (*Ky*): 1.0; Altura del cultivo: 1.0 m

Suelo: Humedad del suelo disponible total (*ADT*): 140 mm/metro; Tasa máxima de infiltración: 30 mm/día; Profundidad radicular máxima: 450 cm; Agotamiento inicial de la humedad del suelo (% de *ADT*): 0%.

Los valores requeridos por el *software* CROPWAT 8.0. en los módulos de "clima/ ETo" y "precipitación" se obtuvieron de la estación climatológica El Juncal (21095010) perteneciente al Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (Ideam), los datos del módulo de "cultivo" para los parámetros de coeficiente del cultivo Kc, el agotamiento crítico y el factor de respuesta del rendimiento fueron tomados del estudio de la FAO (2006) riego y drenaje 56, y los parámetros de profundidad radicular, altura del cultivo y etapas de crecimiento se obtuvieron de forma experimental en campo. Posteriormente, los datos del módulo de "suelo", fueron medidos por los autores en la finca Himalaya verificando su textura franco-arenosa.

Finalmente, el componente gris en la huella hídrica del proceso de cultivo (HHproc, gris, m^3/t) (Ecuación 6), se calculó multiplicando la tasa de aplicación de sustancias químicas por hectárea (TA, kg/ha) por la fracción de lixiviación - escorrentía superficial (α) dividido entre la concentración máxima permitida (c_{max}, kg/m^3) menos la concentración natural (c_{nat}, kg/m^3) y posteriormente divido entre el rendimiento del cultivo (Y, t/ha) (Hoekstra et al., 2011).

$$HHprod, gris = \frac{(\alpha * TA) / (cmax - cnat)}{Y} \qquad (6)$$

Para el cálculo de la huella hídrica gris solo se utilizó como referente de análisis la contaminación del agua por causa de aplicación del fertilizante nitrógeno (N), por ser el contaminante más crítico en estos agrosistemas. Según los parámetros de la FAO (2004) respecto a los niveles de la calidad de agua para riego, la concentración máxima permisible de N es de 30 mg/litro y su tasa de lixiviación es del 10% del total aplicado (Hoekstra y Chapagain, 2008). La concentración natural de N fue tomada en campo y analizada en un laboratorio acreditado de la región, aportando un promedio de 6 mg/ litro de N en cuatro (4) abonadas y una tasa de aplicación de 16.9 kg/ha de N suministrados mediante un plan de fertilización en el ciclo de producción del cultivo.

Fase III: Análisis de Sostenibilidad de la Huella Hídrica.

En el ámbito de una unidad hidrológica, es posible comparar la huella hídrica verde o azul con la disponibilidad de agua verde o azul, o la huella hídrica gris con la capacidad disponible de asimilación de cargas contaminantes; se analizó la perspectiva ambiental, social y económica de la huella hídrica entorno a las áreas de conservación y protección ambiental de la represa La Sucia y el Distrito Asojuncal.

Análisis de Sostenibilidad Ambiental

La sostenibilidad de la huella hídrica verde se evaluó a través del índice de escasez de agua verde (EA_{verde}) (Ecuación 7), definida como la proporción total de la huella hídrica verde en la zona de captación (HH_{verde}) y la disponibilidad de agua verde (DA_{verde}):

Suelos Ecuatoriales 55 (1 y 2): 87-98. https://doi.org/10.47864/se552025p8798

$$\mathrm{E}Averde[x,t] = \frac{HH\ verde\ [x,t]}{DAverde\ [x,t]} \quad (7)$$

Donde, la disponibilidad de agua verde (DA_{verde}) (Ecuación 8), en una zona de captación x en un periodo determinado t, se determinó como la evapotranspiración total del agua lluvia almacenada en el suelo (ET_{verde}), menos la evapotranspiración natural ($ET_{natural}$), menos la evapotranspiración de las zonas improductivas (ET_{inprod}):

$$DAverde = ETverde - ETnat - ETinpr \quad (8)$$

La sostenibilidad de la huella hídrica azul se evaluó a través del índice de escasez de agua azul (EA_{azul}) (Ecuación 9), definida como la relación entre el total de la huella hídrica azul en la zona de captación (HH_{azul}) y la disponibilidad de agua azul (DA_{azul}):

$$EAazul[x,t] = \frac{HHazul[x,t]}{DAazul[x,t]} \quad (9)$$

Donde, la disponibilidad de agua azul (DA_{azul}) (Ecuación 10), en una zona de captación x en un periodo determinado t, se determinó en función de la oferta natural (E_{nat}), menos la oferta regulada (E_{reg}):

$$DAazul[x,t] = Enat[x,t] - Ereg[x,\ t] \quad (10)$$

Las ofertas de agua natural y agua regulada, se determinaron mediante aforos *in situ*, correspondientes al caudal antes de la extracción del recurso hídrico, es decir al caudal ofertado y el caudal extraído de la fuente de captación durante el ciclo biológico según las necesidades de riego del cultivo, mediante un cronograma de riego, el cual fue registrado en la programación de riego en el *software* CROPWAT 8.0.

Finalmente, la sostenibilidad de la huella hídrica gris se evaluó a través del nivel de contaminación de agua (NCA) (Ecuación 11), definido como la porción de la capacidad de asimilación de la carga contaminante N, tomando la relación entre el total de la huella hídrica gris (HH_{gris}) y la escorrentía (E_{real}).

$$NCA[x,t] = \frac{HHgris[x,t]}{Ereal[x,t]} \quad (11)$$

En resumen, los indicadores de escasez de agua verde y azul y el nivel de contaminación se han definido de manera que cuando sobrepasen el 100%, se reflejan condiciones insostenibles e indican un punto crítico ambiental. Un punto crítico ambiental se define como el periodo de tiempo en una zona de captación en las que se violan las necesidades ambientales de agua verde o azul o las normas de calidad del agua (Hoekstra et al., 2011).

Análisis de Sostenibilidad Económico

Según Salmoral et al. (2011) plantea que se debe estimar el valor de producción a precios de mercado por m^3 de agua consumida, ya que esto manifiesta la capacidad de generación de ingresos en relación con el consumo de agua; además que considera como un factor dinámico que evoluciona en el tiempo (Arévalo y Campuzano, 2013). La productividad aparente del agua azul (APW azul, $/m^3) (Ecuación 12), se estimó dividiendo el precio de producción del cultivo en el mercado sobre la huella hídrica azul:

$$APW,\ \ azul = \frac{precio\ \ produccion\ \ \ cultivo}{HH\ \ azul\ \ cultivo} \quad (12)$$

Además, se calculó la productividad aparente de la tierra (APL, $/ha) (Ecuación 13), misma que representa el valor económico a precios constantes en función de las hectáreas cultivadas, para lo cual se estima el precio de la producción del cultivo en el mercado por el rendimiento del cultivo:

$$APL = Precio\ \ produ.cultivo * rendim. \quad (13)$$

La huella hídrica total en una zona de captación es económicamente insostenible

y, por consiguiente, genera un punto crítico económico, cuando el agua no se asigna y se usa de manera económicamente eficiente. Es necesario asignar el agua en una zona de captación de manera económicamente eficiente a los usuarios, y por su parte, usar dicha agua de manera eficiente (Hoekstra et al., 2011).

Análisis de Sostenibilidad Social

Las necesidades humanas básicas relacionadas con la equidad del agua incluyen una cantidad mínima de suministro seguro y limpio de agua dulce para beber, lavar y cocinar (ONU, 2010), esta etapa se fundamenta principalmente en la búsqueda de una sostenibilidad integral del ser humano y en mejorar la calidad de vida de las personas que intervienen en la actividad agrícola. se incluyen criterios propios de evaluación tales como la protección de la salud física y mental de los trabajadores, el trato justo, la provisión de los servicios públicos básicos esenciales (agua potable, saneamiento básico, energía y gas), afectaciones al ecosistema y conflictos como producto de la apropiación del agua.

Fase IV: Formulación de Respuesta a la Huella Hídrica

Describe el proceso de construcción gradual y colectiva de las acciones necesarias para aportar a la solución de las problemáticas críticas identificadas en la investigación y que fueron el resultado de la evaluación de la huella hídrica del cultivo del arroz. Se establecieron estrategias de respuesta enfocadas principalmente al aumento en la eficiencia del recurso hídrico disponible y también al aumento de la equidad y productividad económica, con el ánimo de formular lineamientos, tomando como referente las propuestas de la política nacional para la gestión integral del recurso natural.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Fase I: Definición de objetivos y alcance

El área objetivo corresponde a la finca Himalaya, ubicada a 15 km de la ciudad de Neiva, en cercanías a la represa La Sucia y al Distrito de riego Asojuncal, municipio de Palermo, Huila. Tiene una extensión de 13.75 ha destinadas al cultivo de arroz *Oryza Sativa*, se caracteriza por tener un clima cálido seco y una formación vegetal o zona de vida según Holdridge bosque seco tropical (bsT) apto para el cultivo del cereal utilizando como principal fuente de abastecimiento el río Magdalena (Figura 1) (Asociación de Usuarios del Distrito de Adecuación de Tierras de Mediana Escala El Juncal - ASOJUNCAL, 2018).

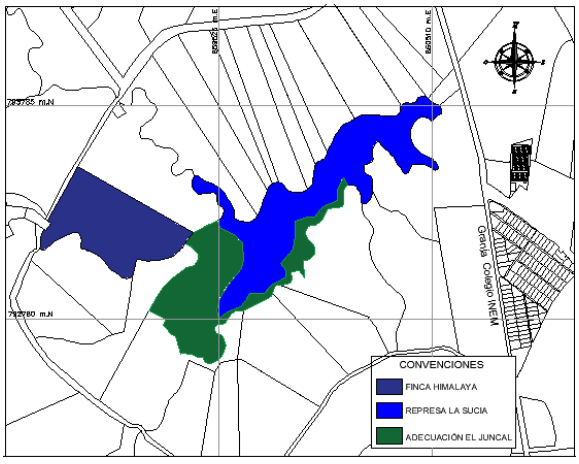


Figura 1. Localización Finca Himalaya.

Según el Esquema de Ordenamiento Territorial del municipio de Palermo (EOT), el área de estudio se halla a 460 m.s.n.m., su precipitación anual promedio es de 1490 mm con distribución bimodal, los máximos valores se presentan en los meses de noviembre y marzo, y los mínimos en los meses de agosto y enero. La temperatura media tiene valores máximos promedios mensuales de 27.5 °C, siendo el mes de agosto el más cálido; y con un alto número de horas luz de incidencia directa sobre la región; el mes de noviembre tiene la temperatura promedio más baja del año (Municipio de Palermo, 2000).

Suelos Ecuatoriales 55 (1 y 2): 87-98. https://doi.org/10.47864/se552025p8798

Las condiciones geodésicas del terreno, modelada a través del uso del *software* libre QGIS, determinan una topografía ligeramente ondulada, con pendientes que oscila entre 3 y 7 % (Figura 2); esto dificulta las condiciones para mantener el agua de riego en la superficie del cultivo afectando el cultivo por estrés hídrico.

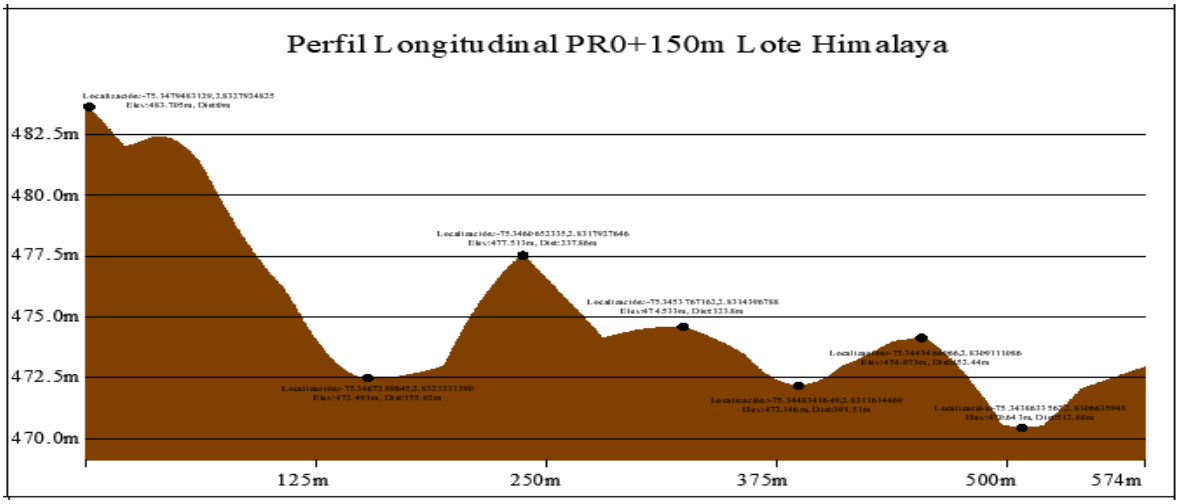


Figura 2. Topografía general PR0+150m, longitudinal.

Es a través de caballones de nivelación que se controla el agua de riego, logrando de esta manera asegurar la lámina de agua requerida para el desarrollo óptimo del cultivo de arroz. Sin embargo, el volumen de agua desperdiciada durante el ciclo productivo es bastante elevado y esto acarrea gastos adicionales y posible insostenibilidad económica.

Fase II: Contabilidad de la huella hídrica.

A continuación, se presentan los resultados promedios mensuales de la huella hídrica total del cultivo de arroz de la finca correspondiente a la sumatoria de los componentes verde, azul y gris (tabla 2).

Tabla 2. Huella Hídrica del cultivo de arroz *Oryza Sativa*

Huella Hídrica	(m^3/t)			
	HH Verde	HH Azul	HH Gris	HH Total
Cultivo arroz	260.8	994.4	146.5	1401.7

La huella hídrica estimada en el cultivo de arroz es de 1401.7 m^3/t por mes; producto de las huellas hídricas verde, correspondiente al 19%, azul con 71%, y gris con 10%, un valor inferior al establecido por Silva (2015), quien encontró 1974 m^3/t, y superior al de Ramírez et al. (2017), quienes estimaron 1039 m^3/t. así mismo, el Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural en el sector arrocero del Tolima (2016) con un sistema de producción similar, reportó un promedio de huella hídrica total de 1069 m^3/t, y a nivel mundial de 1146 m^3/t, valores inferiores a los del presente estudio.

Según Chapagain y Hoekstra (2011), la composición hídrica total a nivel nacional del cultivo de arroz está representada por el 44% verde, 49% azul y 7% gris, valores diferentes a los estimados en el cultivo de arroz de la finca Himalaya. Se puede evidenciar, una baja apropiación de agua verde en el cultivo y, por el contrario, una alta apropiación de agua azul, lo que indica un desbalance en apropiación de las huellas hídricas verde y azul.

Los resultados de la huella hídrica gris del presente estudio son similares a los obtenidos por Builes (2013) para la cuenca del río Porce, quien determinó que la fuente hídrica contaba con la capacidad de diluir las cargas contaminantes aportadas por los productos utilizados en las actividades agrícolas y pecuarias con valores del 8%.

Fase III: Evaluación de la sostenibilidad de la huella hídrica.

Análisis de Sostenibilidad Ambiental

El índice de escasez de agua verde (Everde, ciclo) (Tabla 3), muestra un valor de 0.24, lo que indica un estado de sostenibilidad media-baja con respecto a la disponibilidad de agua verde para satisfacer las necesidades de agua verde causadas por la actividad agrícola, así como de las áreas de reserva natural, áreas protegidas y de conservación, con el fin de preservar la biodiversidad y los ecosistemas del lugar.

El índice de escasez de agua azul (Tabla 3), muestra un valor de 0.74, lo que indica un estado de sostenibilidad alto en el cultivo de arroz de la finca con respecto a la disponibilidad de agua azul de riego, y que se ejerce una gran presión sobre el recurso hídrico para satisfacer las necesidades propias del cultivo de arroz.

El resultado obtenido para el nivel de contaminación del agua (NCA) de la finca Himalaya es de 0.14, e indica que aún el afluente tiene capacidad para asimilar el contaminante analizado de N (Tabla 4).

Tabla 3. Índice de Escasez de Agua verde (Everde) y Agua azul (Eazul).

Mes	Dav	Vav	HH Verde	Ever	Dazul	HH Azul	Eazul
	mm	m^3/ha	t/m^3	[-]	l/s	m^3/mes	[-]
Mensual	106.84	1068.4	260.8	0.24	123,070	90738.4	0.74

Tabla 4. Índice de Contaminación del Agua (NCA)

HH Gris (m^3/t)	Escorrentía (Rreal) mm	Índice de Contaminación del Agua (NCA)
146.5	989.8	0.14

No obstante, estos resultados por sí solos no reflejan el estado de la calidad del agua, pues en este estudio únicamente se tiene en cuenta uno de los contaminantes asociados al sector agrícola. Sin embargo, en el distrito de riego se desarrollan actividades pecuarias de ganadería, piscicultura, entre otros, que generan contaminantes adicionales al N que pueden traer afectaciones en la calidad del agua y la atmosfera.

Análisis de Sostenibilidad Económico

Para estimar la productividad aparente del agua (APW, $/$m^3$), se tuvo en cuenta el precio de arroz paddy establecido por Fedearroz para el mes de junio de 2022 correspondiente a la temporada de cosecha, cotizándose en un valor de $ 1.330.000 pesos por tonelada. De esta manera, se tiene un costo de $ 1337 pesos por cada m^3 de agua azul consumida por el cultivo de arroz, un valor productivo, bastante elevado comparado con el valor por m^3 pagado al distrito de riego ASOJUNCAL por los servicios prestados de agua para riego de $ 76 pesos por m^3 de agua captada de la fuente superficial del rio Magdalena (Tabla 5). Así mismo, se estableció que la productividad aparente de la tierra (ALP, $/ha), es de $

Suelos Ecuatoriales 55 (1 y 2): 87-98. https://doi.org/10.47864/se552025p8798

8.778.000 por hectárea cultivada, un valor similar a los gastos de operación requeridos por hectárea para cultivar arroz *Oryza sativa* en la zona del distrito (Tabla 5).

Tabla 5. Productividad aparente del agua azul (APW) y productividad aparente de la tierra (APL).

Costo arroz	HH azul	APW	Rendim.	APL
$/t	m^3/t	$/$m^3$	t/ha	$/ha
1.330.000	994.4	1,337	6.6	8.778.000

Aunque la productividad aparente de la tierra (APL, $/ha) no reporta directamente información sobre el uso de los recursos hídricos, complementa el análisis de sostenibilidad, puesto que los cambios producidos en él vienen motivados por las respuestas que adoptan los productores en relación con una serie de variables sobre las que pueden incidir y que afectan directamente a la producción y a sus resultados económicos (cambios de cultivos, mejoras tecnológicas, agua disponible para uso) y también a distintos condicionantes externos sobre los que no pueden actuar, pero que también modifican sus resultados económicos y producciones (subvenciones recibidas y las restricciones que estas acarrean, evolución de los precios de los cultivos y las disponibilidades hídricas) (Gómez-Limón *et al.,* 2009).

Análisis de Sostenibilidad Social

Según datos estimados en el Esquema de Ordenamiento Territorial de Palermo (Huila), la comunidad de agricultores en la zona cuenta con una cobertura total de los servicios públicos de gas suministrado por la empresa Alcanos de Colombia, agua potable suministrada por la junta administradora de acueducto y los servicios de energía son suministrados por la empresa Electrohuila (Municipio de Palermo, 2000).

Respecto a la cobertura de la salud, el agricultor y su núcleo familiar se hallan afiliados al sistema de identificación de potenciales beneficiarios Sisbén, pertenecientes al grupo A, dirigido a la población de pobreza extrema. El sistema de saneamiento básico, se realiza mediante pozos sépticos los cuales se encuentran colmatados debido a la falta de mantenimiento. Por otro lado, no se evidencia un adecuado plan de manejo de los residuos sólidos producto del cultivo.

Fase IV: Formulación de respuesta.

Se propone realizar seis (6) programas de carácter ambiental, económico y social que tiene como finalidad estabilizar la huella hídrica verde y reducir las huellas hídricas azul y gris, así como concientizar a los agricultores que pertenecen al distrito de riego sobre la protección de los recursos hídricos, mediante los siguientes programas de capacitación:

1. **Rotación y técnicas de cultivo de arroz en cada estación del año.**

Capacitaciones sobre tecnificación de la tierra y rotación de cultivos cuyo propósito es optimizar el uso del agua, se mejoren las condiciones físicas y químicas de los suelos con alternativas en la producción de cultivos con potencial de forraje en época seca, como maíz, sorgo forrajero y soja, y el uso de energías sostenibles como eólica, solar y tecnologías de sostenibilidad y responsabilidad social.

2. **Riego de cultivos de arroz proporcionado por CROPWAT 8.0.**

Capacitaciones sobre uso de herramientas ofimáticas y sistemas de información geográfica, cuyo propósito es aprender a interpretar los parámetros meteorológicos y los requerimientos de agua, con el fin de

estimar la huella hídrica en sus cultivos, estableciendo sistemas sostenibles de riego y reducción en los costos por suministro de agua.

3. **Prácticas de abono y control de plagas.**

Capacitaciones sobre elaboración de abonos orgánico - minerales, biocontroladores de patógenos, productos alelopáticos, repelentes de origen orgánico – mineral, uso de elementos de protección personal, manejo de plaguicidas y fertilizantes con el fin de reducir las cargas contaminantes y los efectos nocivos a la salud de los agricultores.

4. **Mantenimiento de infraestructura para riego y drenaje.**

Capacitaciones sobre el mantenimiento y limpieza de las obras hidráulicas, como redes, canales y accesorios, con el fin de controlar daños, fugas, prevención de accidentes, para reducción en costos de combustible y reducción en gastos de operabilidad.

5. **Manejo de desechos peligrosos.**

Capacitaciones sobre clasificación y manejo de residuos peligrosos y disposición final, con el fin de reciclar, reducir plagas y afectaciones a la salud de los agricultores.

6. **Cuidado y conservación del medio ambiente.**

Capacitaciones sobre conservación y protección de bosques, fuentes hídricas, flora y fauna, identificando zonas de sostenibilidad ambiental, delimitación de senderos ecológicos y cuerpos de agua hídricos destinados a la conservación y protección de los recursos naturales renovables.

CONCLUSIONES

Se estimó que la huella hídrica mensual del cultivo de arroz *Oryza sativa* con un ciclo fenológico de 150 días, es de 1.402 m^3/t; constituyendo el mayor componente la huella azul con 71%, seguido del componente verde con 19% y, finalmente el componente gris con 10%.

En el ciclo productivo del cultivo de arroz se ocasionan pérdidas de agua de riego del 33%, lo cual genera pérdidas económicas en gastos de combustible, aceite y agua para riego, además de degastes en el motor y contaminación atmosférica, producto de su operación.

Para el óptimo manejo del recurso hídrico es necesaria la adecuada nivelación del terreno para garantizar la eficiencia del agua; si bien es una inversión considerable, el beneficio es muy grande, ya que no solo se reduce el consumo de agua en el cultivo, sino que también facilita el control de las malezas, insectos y en general las enfermedades propias del arroz.

REFERENCIAS

Anacona, P. y Rojas, F. (1999). *Clasificación de los suelos de la granja "La Universidad" con fines de riego y drenaje* [Tesis de grado]. Programa de Ingeniería Agrícola, Facultad de Ingeniería, Universidad Surcolombiana. Neiva.

Arévalo, D. U. y Campuzano, C. O. (2013). *Evaluación de la huella hídrica en la cuenca del Río Porce.* Centro de Ciencia y Tecnología de Antioquia - CTA.

ASOJUNCAL (2018). Asociación de Usuarios del Distrito de Adecuación de Tierras de Mediana Escala El Juncal - *Localización*. https://www.asojuncal.com/localizacion

Banco Mundial (2022). *El agua en la agricultura.* https://www.bancomundial.org/es/topic/water-in-agriculture

Builes, E. D. (2013). *Cuantificación y análisi de sostenibilidad ambiental de la huella hídrica agrícola y pecuaria de la cuenca*

del río Porce [Tesis de Maestría en Medio Ambiente y Desarrollo]. Facultad de Minas, Departamento de Geociencias y Medio Ambiente, Universidad Nacional de Colombia. Medellín.

CGIAR (2015). Programa de Investigación en Cambio Climático, Agricultura y Seguridad Alimentaria - CCAFS. *¿Qué es la huella hídrica y cuál es su importancia en la agricultura?* Iagua. https://www.iagua.es/noticias/colombia/ccafs/15/12/10/que-es-huella-hidrica-y-cual-es-importancia-agricultura.

FAO (2004). Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, *El arroz y el agua: una larga historia matizada.* https://www.fao.org/3/y4875s/y4875s00.pdf

FAO (2006). Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación -. *Evapotranspiración del cultivo: Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos.* Manual 56.

FAO (2019). Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. *Agriculture and climate change: challenges and opportunities at the global and local level, collaboration on climate-smart agriculture*. ISBN 978-92-5-131281-0

FAO (2025). Informe mundial sobre las crisis alimentarias de 2025. https://www.fao.org/director-general/speeches/details/launch-of-the-2025-global-report-on-food-crises--statement/es

Chapagain, A. y Tickner, D. (2012). Water footprint: help or hindrance?. *Water Alternatives 5*(3), 563-581. https://www.water-alternatives.org/index.php/all-abs/186-a5-3-2/file

Gómez-Limón, J., Calatrava, J., Garrido, A., Sáez, F. y Xabadia, A. (Eds.). (2009). *La economía del agua de riego en España: una perspectiva regional.* Fundación Cajamar. ISBN:978-84-95531-45-2

Guauque, D. E., y Barreto, L. E. (2017). *Evaluación del impacto ambiental de los sistemas predominantes de producción agropecuaria en la microcuenca La Plata* [Tesis de grado]. Universidad del Tolima. Ibagué. https://repository.ut.edu.co/handle/001/2365

Hoekstra A. Y., Chapagain A. K., Aldaya, M. y Mekonnen, M. (2011). *The water footprint assessment manual: Setting the global standard.* Water Footprint Network. Earthscan. ISBN: 978-1-84971-279-8 hardback

Hoekstra, A. y Chapagain, A. (Eds.) (2008). *Globalization of water. sharing the planet's freshwater resources.* Blackwell Publishing Ltd. Print ISBN:978-1-4051-6335-4. Online ISBN:9780470696224. DOI:10.1002/9780470696224

Hoekstra, A. Y., Booij, M. J. y Hunink J.C. (2012). *Blue water footprint of agriculture, industry, households and water management in the Netherlands*. UNESCO, IHE. DOI:10.13140/RG.2.1.2276.3043

Lozano, D. y Cortés, N. (2016). *Evaluación de la huella hídrica del proceso productivo del arroz (Oryza sativa) en el municipio del Espinal – Tolima y su incidencia ambiental en el área de influencia* [Tesis de pregrado]. Facultad de Ingeniería Ambiental y Sanitaria, Universidad de la Salle.

Municipio de Palermo. (2000). *Esquema de Ordenamiento Territorial Palermo Huila 2000: EOT Palermo Huila 2000*.

OMM (2025). Informe de la Organización Meteorológica Mundial. La espiral de consecuencias de los eventos meteorológicos y climáticos. https://wmo.int/es/news/media-centre/

ONU (2010). Organización de las Naciones Unidas. "The human right to water and sanitation", UN General Assembly, 64th session, Agenda item 48, UN, New York, NY.

Unesco (2012). Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia. y la Cultura - *Educación para el desarrollo sostenible. Libro de consulta.* Instrumentos de aprendizaje y formación N°. 4. Unesco. ISBN 978-92-3-001077-5

Ramírez, L., Vilches, R., Lizano, R., Pinzón, I. y Sandoval, E. (2017). Estimación de la huella hídrica y de carbono en los cultivos comunitarios de quínoa (*Chenopodium Quinoa Wild*) correspondientes a la zona central de los andes ecuatorianos. *Anales Científicos, 78*(2), 173. ISSN 0255-0407 (Versión impresa). DOI: http://dx.doi.org/10.21704/ac.v78i2.1054

Salmoral, G.; Dumont, A.; Aldaya, M.M.; Rodríguez-Casado, R.; Garrido, A.; Llamas, M.R. (2011). Análisis de la huella hídrica extendida de la cuenca del Guadalquivir. *Papeles de seguridad hídrica y alimentaria y cuidado de la naturaleza. Número 1*. Fundación Marcelino Botín, Pedrueca 1, Santander, España. ISBN: 978-84-96655-94-2

Silva, A. (2015). *Gestión hídrica y metabolismo hídrico en la producción agrícola ecuatoriana: análisis de la huella hídrica en el año 2010.* Pontificia Universidad Católica del Ecuador.

United Nations, 2024. World Population Prospects, Summary of Results. Department of Economy and Social Affairs, 64p. New York.

Water Footprint Network. (2009). *What is a water footprint assessment?.* https://waterfootprint.org/en/water-footprint/what-is-water-footprint/

SUELOS ECUATORIALES

Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo

https://doi.org/10.47864/se552025p99116

Efectos de las actividades socioeconómicas sobre las propiedades fisicoquímicas del suelo, El Motilón-Laguna de la Cocha

Effects of socioeconomic activities on the physicochemical properties of the soil, El Motilón-Laguna de la Cocha

Huertas Jenny[1*]✉, Escobar Sofia[1], Cuaspa Sofia[1], Coral-Paredes Eliana[2], Lafaurie Gabriel[1]

[1*] Universidad Mariana, Pasto, Colombia.
[2] Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia

Vol. 55 (1 y 2) de 2025 | pp: 99-116 | ISSN 0562-5351 E-ISSN 2665-6558 | REC.: 14/06/2026 - ACEP.: 04/09/2026

RESUMEN

Los suelos ribereños de la Laguna de La Cocha, humedal RAMSAR altoandino, sostienen funciones de regulación hídrica, almacenamiento de carbono y protección de la calidad del agua, pero enfrentan presión por agricultura y ganadería. Este estudio evaluó los efectos de dichas actividades sobre las propiedades fisicoquímicas del suelo en la vereda El Motilón y su coherencia con la planificación territorial. Se compararon tres usos de suelo —conservación, ganadería y cultivo de papa— mediante 18 muestras tomadas a 0–20 cm en parcelas de 24 m². Se determinaron pH, conductividad eléctrica, textura, humedad, densidad aparente y real, porosidad, materia orgánica y capacidad de intercambio catiónico; las diferencias se analizaron con ANOVA y prueba de Tukey. Los resultados se integraron con un análisis multitemporal de coberturas 2002–2020 y con la zonificación del POT de Pasto. Frente al suelo de conservación, los sistemas productivos mostraron pérdida de materia orgánica de 46–60%, incremento de la densidad aparente de 70% en ganadería y 123% en agricultura, reducción de la porosidad y acidificación. La agricultura presentó la mayor degradación física, con mayor humedad asociada a drenaje deficiente y compactación. El análisis espacial evidenció reemplazo de coberturas naturales por pastos y cultivos, así como conflictos entre el uso actual, las zonas agropecuarias sostenibles y áreas de preservación estricta. Se concluye que las prácticas agropecuarias actuales son insostenibles, degradan la salud del suelo y comprometen funciones ecológicas clave, por lo que se requiere restauración, manejo sostenible y fortalecimiento de la gobernanza territorial.

Palabras clave: Degradación del suelo; actividades agropecuarias; propiedades fisicoquímicas; zona ribereña; Laguna de La Cocha.

ABSTRACT

Riparian soils of La Cocha Lake, a high-Andean Ramsar wetland, support hydrological regulation, carbon storage, and water-quality protection functions, but are under pressure from agriculture and livestock activities. This study evaluated the effects of these activities on the physicochemical properties of soil in El Motilón village and their consistency with territorial planning. Three land uses were compared: conservation, livestock, and potato cropping. A total of 18 soil samples were collected at 0–20 cm depth from 24 m² plots. Soil pH, electrical conductivity, texture, moisture, bulk and particle density, porosity, organic matter, and cation exchange capacity were determined; differences were analyzed using ANOVA and Tukey's test. The results were integrated with a multitemporal land-cover analysis from 2002 to 2020 and with the zoning established in Pasto's Land Use Plan. Compared with

conservation soil, productive systems showed a 46–60% loss of organic matter, a 70% increase in bulk density under livestock use, and a 123% increase under agriculture, along with reduced porosity and soil acidification. Agriculture showed the greatest physical degradation, with higher moisture associated with poor drainage and compaction. Spatial analysis revealed the replacement of natural cover by pastures and crops, as well as conflicts between current land use, sustainable agricultural zones, and strict preservation areas. It is concluded that current agricultural and livestock practices are unsustainable, degrade soil health, and compromise key ecological functions; therefore, restoration, sustainable management, and stronger territorial governance are required.

Keywords: Soil degradation; agricultural and livestock activities; physicochemical properties; riparian zone; La Cocha Lake

INTRODUCCIÓN

Los suelos de alta montaña andina desempeñan funciones esenciales en la regulación hídrica, el almacenamiento de carbono y el mantenimiento de la calidad ambiental (Zúñiga et al., 2018). En este contexto, la Laguna de La Cocha, humedal RAMSAR de importancia internacional, depende en gran medida de la integridad de los suelos de su cuenca hidrográfica para conservar sus funciones ecológicas (López et al., 2015). Los suelos ribereños constituyen zonas de amortiguamiento naturales que favorecen la retención de nutrientes, el procesamiento de materia orgánica y la protección de los cuerpos de agua. No obstante, la sustitución de la vegetación nativa por actividades agropecuarias puede alterar estas funciones, incrementando el riesgo de degradación del suelo y afectación de la calidad del agua por el aporte de sedimentos y nutrientes (Romero-Ruiz et al., 2023).

En la vereda El Motilón, ubicada en la zona noroccidental de la Laguna de La Cocha, la expansión de cultivos de papa y la actividad ganadera constituyen las principales presiones sobre los ecosistemas ribereños. Sin embargo, existe información limitada sobre los efectos de estas actividades en las propiedades fisicoquímicas del suelo.

Por lo tanto, el objetivo de este estudio fue evaluar los cambios en las propiedades fisicoquímicas del suelo bajo tres usos representativos (conservación, ganadería y agricultura) en la vereda El Motilón. Adicionalmente, los resultados se relacionaron con la dinámica de cobertura del suelo entre 2002 y 2020 y con la zonificación establecida en el Plan de Ordenamiento Territorial (POT), bajo la hipótesis de que las actividades agropecuarias generan procesos de degradación edáfica asociados a cambios en el uso y manejo del territorio.

MATERIALES Y MÉTODOS

Localización

El estudio se desarrolló en la vereda El Motilón, corregimiento El Encano (Pasto, Nariño), ubicada en la cuenca alta del río Guamuez, en el área de influencia de la Laguna de La Cocha. La zona se localiza entre 2760 y 3400 m.s.n.m., presenta temperaturas medias entre 8 y 12 °C, precipitación anual cercana a 1630 mm y humedad relativa promedio de 86,5%. Se evaluaron tres usos del suelo representativos de la zona ribereña: conservación, ganadería y agricultura (Figura 1).



Figura 1. Zona de estudio. Fuente de consulta: datos tomados del IGAC.

Recolección de muestras de suelo

En cada uso del suelo (conservación, ganadería y agricultura) se estableció una parcela de 24 m². Se aplicó un muestreo en cuadrícula con separación de 2 m entre puntos, recolectando seis muestras disturbadas a una profundidad de 0–20 cm por parcela, consideradas como réplicas para el análisis estadístico (IGAC, 2017). En total, se obtuvieron 18 muestras de suelo

Análisis en laboratorio

Las muestras fueron acondicionadas y analizadas en el laboratorio de la Universidad Mariana, sede Alvernia. Se determinaron las propiedades fisicoquímicas del suelo mediante metodologías estandarizadas descritas en la Tabla 1. Todos los análisis se realizaron por triplicado para cada muestra.

Tabla 1. Metodología para la determinación de parámetros fisicoquímicos

Parámetro	Método de medición
pH (1:1)	Potenciómetro
Conductividad eléctrica $dS\ \ m^{-1}$	Conductímetro
Textura	Bouyoucos
Humedad (%)	Gravimétrico secado a 105 °C peso constante
Densidad aparente $\left(g\ \ cm^{-3}\right)$	Método del cilindro
Densidad real $\left(g\ \ cm^{-3}\right)$	Método del picnómetro
Porosidad total (%)	Relación entre densidad real y aparente
Materia orgánica (%)	Pérdida por calcinación
Capacidad de intercambio catiónico $\left(meq100g^{-1}\right)$	Titulométrico, acetato de amonio al 1 N a pH 7,0

Fuente de consulta: (Sadzawka et al., 2006).

Análisis estadístico

Los datos obtenidos para cada propiedad fisicoquímica del suelo fueron analizados mediante estadística descriptiva y análisis de varianza (ANOVA) de una vía, utilizando el software SPSS Statistics. Este análisis permitió evaluar el efecto del uso del suelo (conservación, ganadería y agricultura) sobre las variables estudiadas e identificar diferencias significativas entre tratamientos. Cuando el ANOVA mostró diferencias significativas ($p \leq 0,05$), se aplicó la prueba de comparación múltiple de Tukey para establecer cuáles usos del suelo diferían entre sí. Los resultados se presentan como medias ± error estándar y se representaron gráficamente mediante SigmaPlot versión 12.0.

Como complemento interpretativo de los indicadores fisicoquímicos, se incorporaron los valores del índice de fragilidad dC/dB obtenidos para cada uso del suelo a partir de los datos de carbono orgánico y densidad aparente de esta investigación. La interpretación se realizó bajo el marco conceptual de fragilidad del suelo propuesto por Clunes et al. (2022), que diferencia la fragilidad inherente asociada a las propiedades propias del suelo de la fragilidad añadida generada por presiones antrópicas. Los valores de dC/dB se emplearon como indicador integrado para discutir la pérdida de funcionalidad y la proximidad a condiciones críticas; su comparación con umbrales reportados en otros Andisoles se considera indicativa y no una validación de un umbral local.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Fragilidad del suelo como marco para interpretar la degradación

La degradación del suelo no debe interpretarse únicamente a partir de valores absolutos de una propiedad aislada. En suelos volcánicos, propiedades como una baja densidad aparente y una elevada porosidad son características inherentes de su génesis y mineralogía; por ello, cambios relativamente pequeños o moderados respecto a la condición de referencia pueden representar pérdidas funcionales relevantes. Clunes et al., (2022) proponen el concepto de fragilidad del suelo como la susceptibilidad del sistema a perder funciones cuando las presiones externas superan su capacidad de resiliencia. Este marco reconoce una fragilidad inherente, determinada por las características naturales del suelo, y una fragilidad añadida, asociada con intervenciones antrópicas como labranza, tránsito o pisoteo. Cuando la presión excede la capacidad de recuperación, el sistema puede aproximarse a un punto de no retorno, en el cual la restauración de su condición funcional original se vuelve limitada o improbable.

Bajo este enfoque, la condición de conservación se utiliza en este estudio como referencia funcional y los usos ganadero y agrícola se interpretan por la trayectoria conjunta de materia orgánica, carbono orgánico, densidad aparente, porosidad, humedad y rasgos morfológicos. Esta lectura integrada es especialmente importante en Andisoles, donde valores absolutos que podrían parecer favorables al compararlos con suelos minerales pueden ocultar una alteración significativa respecto al estado natural del mismo suelo.

Caracterización morfológica y su relación con el uso del suelo

La caracterización morfológica no se restringió al color y la profundidad. En cada perfil se describieron además estructura, consistencia, condición de humedad, adhesividad/plasticidad, textura al tacto y rasgos redoximórficos (Tabla 2). La interpretación de estos atributos se realizó de manera conjunta con las propiedades fisicoquímicas medidas. En consecuencia, las diferencias de espesor de horizontes y color se consideran evidencias complementarias de alteración y condiciones de drenaje, pero no se emplean de forma aislada para demostrar erosión o compactación

Zona de conservación

El suelo bajo conservación presentó un perfil profundo con horizontes superficiales oscuros, caracterizados por un horizonte A de 20 cm de espesor sobre un horizonte subsuperficial de color marrón muy oscuro (7.5YR 2.5/2). Estos rasgos son característicos de Andisoles de alta montaña y reflejan una elevada acumulación de materia orgánica favorecida por las bajas temperaturas y el aporte continuo de biomasa vegetal (Crosara, 2016). A partir de los 38 cm de profundidad se observó un horizonte grisáceo (10YR 5/1) asociado a procesos de gleyzación, indicando condiciones periódicas

Suelos Ecuatoriales 55 (1 y 2): 99-116. https://doi.org/10.47864/se542024p99116

Tabla 2. Descripción del perfil en los tres usos de suelo.

Uso Actual	Horizonte	Prof (cm)	Estructura β	Consistencia		Color	Textura al tactoρ	Comentario	Altura (msnm)
				Humedadα	Saturaciónγ				
Zona de conservación	H1	0 - 20	BSA	Fri	MAd,MP	7,5YR 2,5/2	F		2780
	H2	20 - 38	BSA	Fri	Ad,P	10YR 2/1	FL		
	H3	38 - 58	BSA	S	NAd,NP	10YR 5/1	Ar	Horizonte de depositación aluvial de arenas	
	H4	58 - 80	BSA	Fri	Ad,P	10YR 2/1	L	Presencia de Nivel Freático	
Zona de Ganadería	H1	0 – 30	BSA	Fri	Ad,LP	7,5YR 2,5/2	Fa		2796
	H2	30 – 43	BA	Fir	Ad,P	10YR 2/1	FL	Rasgos redoximórficos (7.5 YR 3/6)	
	H3	43 - 97	BSA	FR	LAd,LP	2.5 Y 4/4	FA	Rasgos redoximórficos (2.5 Y 5/4, 5 YR 2/6)	
Zona Agrícola	H1	0 – 9	BSA	Fir	MAd,MP	10 YR 2/2	FAL		2815
	H2	9 – 25	BSA	Fir	MAd,MP	10 YR 3/2	AL		
	H3	25 – 45	BA	Fir	LAd,P	5 Y 4/1	FAa		
	H4	45 – 66	BA	FIR	LAd,P	2.5 Y 5/4	FAa	Rasgos redoximórficos (2.5 Y 5/6)	
	H5	66 – 100 +	BA	Mfir	MAd,MP	2.5 Y 6/2	FAL		

ρ Clase textural al tacto. Ar = arenosa; F = franca; FL = franco limosa; FAa = franco arcillo arenosa; FAL = franco arcillo limosa; L = limo; α Determinada según contenido de agua en campo al momento de la descripción del perfil. S = Suelto; Fri = friable; Fir = firme; Mfir = muy firme; γ Determinada en condiciones de completa saturación. MP = muy plástico; P = plástico; LP = ligeramente plástico; NAd = no adhesivo; LAd = ligeramente adhesivo; Ad = adhesivo; MAd = muy adhesivo.

de saturación hídrica y fluctuación del nivel freático (Dorronsoro, 2016), típicas de los suelos ribereños de la Laguna de La Cocha.

Zona ganadera

El perfil ganadero también mostró un horizonte superficial oscuro (30 cm de espesor, color negro 10YR 2/1), lo que sugiere una alta acumulación de materia orgánica, posiblemente derivada de las gramíneas y las excretas del ganado. Sin embargo, el rasgo más distintivo fue el cambio abrupto a los 43 cm hacia un horizonte de color marrón oliva (2.5Y 4/4) con abundantes moteados rojizos. Estos rasgos redoximórficos son indicativos de fluctuaciones periódicas del nivel de agua (Soil Survey Staff, 2006). La presencia de un horizonte superficial profundo, pero con evidencia de mal drenaje subsuperficial podría ser una consecuencia de la compactación inducida por el pisoteo del ganado, que reduce la macroporosidad y la conductividad hidráulica en las capas inferiores, llevando a una saturación temporal por encima de la capa compactada (Crosara, 2016).

Zona agrícola

Bajo el uso agrícola, el perfil del suelo mostró la mayor alteración. El horizonte A era notablemente delgado (9 cm), de color marrón muy oscuro (10YR 2/2). La reducción de su espesor en comparación con la zona

de conservación (20 cm) es compatible con una mayor perturbación del horizonte superficial y con procesos de pérdida de suelo favorecidos por la labranza; sin embargo, este rasgo morfológico se interpreta como evidencia complementaria y no como una medición directa de erosión (Quichimbo et al., 2012). Debajo de esta capa, la secuencia de colores hacia tonos más grises y pálidos (5Y 4/1 y 2.5Y 6/2) en profundidad sugiere una menor acumulación de materia orgánica y condiciones de drenaje deficiente. El laboreo periódico puede romper agregados, modificar la distribución de poros y favorecer la formación de capas más densas o compactadas, con potenciales efectos sobre la aireación y el movimiento del agua (Estupiñán et al., 2009). Estas observaciones morfológicas adquieren mayor significado al analizarse conjuntamente con el aumento significativo de la densidad aparente, la pérdida de porosidad y la disminución de materia orgánica registradas en la zona agrícola.

Caracterización fisicoquímica

Comportamiento de la Textura como resultado del cambio de uso.

Los tres usos del suelo presentaron texturas gruesas, clasificadas como areno-franco en la zona de conservación y franco-arenoso en las zonas ganadera y agrícola (Tabla 3). Aunque la textura es una propiedad relativamente estable, el mayor contenido de limo y arcilla observado en los sistemas productivos sugiere procesos de degradación asociados a la pérdida del horizonte superficial por erosión y al consecuente afloramiento de horizontes subsuperficiales más finos (Varón-Ramírez et al., 2022).

Estas diferencias texturales tienen implicaciones funcionales directas. Si bien el mayor contenido de finos en los suelos agrícola y ganadero podría sugerir una mayor capacidad de retención de agua y nutrientes, la condición general arenosa de los tres sistemas los define como suelos con alta permeabilidad. Esto, sumado al uso de fertilizantes y a las excretas del ganado, confirma una alta vulnerabilidad a la lixiviación de nutrientes como nitratos y fosfatos hacia la Laguna de la Cocha, tal como advierten Llambí et al., (2012) para ecosistemas similares.

Comportamiento del pH como resultado del cambio de uso.

Los valores de pH registrados en las tres zonas oscilaron entre 5,1 y 5,3, clasificando los suelos como fuertemente ácidos, condición característica de los Andisoles desarrollados bajo ambientes de alta precipitación y procesos intensos de lixiviación. Sin embargo, el análisis de varianza evidenció un efecto significativo del uso del suelo sobre esta propiedad ($p < 0,05$). La prueba de Tukey mostró que la zona de conservación presentó un pH significativamente mayor que las zonas agrícola y ganadera, mientras que entre estos

Tabla 3. Textura en las tres zonas de estudio.

Uso de suelo	Composición			Textura
	% Arena	*% Limo*	*% Arcilla*	
Zona de conservación	81,8	8,7	9,4	Areno franco
Zona ganadera	67,1	17,4	15,4	Franco arenoso
Zona agrícola	69,8	14,7	15,4	Franco arenoso

Suelos Ecuatoriales 55 (1 y 2): 99-116. https://doi.org/10.47864/se542024p99116

dos sistemas productivos no se encontraron diferencias estadísticas (Figura 2A).

La ausencia de diferencias entre agricultura y ganadería sugiere que, aunque las prácticas de manejo son distintas, ambas generan procesos de degradación química con efectos similares sobre la acidez del suelo. En contraste, el mayor pH observado en la zona de conservación puede atribuirse a su elevado contenido de materia orgánica, la cual contribuye a la capacidad amortiguadora del suelo y favorece una mayor estabilidad química del sistema (Curtin y Trolove, 2013).

La disminución del pH en los sistemas productivos constituye un indicador de degradación asociado al cambio de uso del suelo. En la zona agrícola, este comportamiento puede relacionarse con la aplicación continua de fertilizantes nitrogenados, cuya nitrificación libera protones (H^+) y favorece la acidificación (Abanto-Rodríguez et al, 2026). De manera similar, en la zona ganadera, la transformación del nitrógeno proveniente de las excretas animales contribuye al mismo proceso. Aunque las diferencias numéricas fueron moderadas, los resultados evidencian una tendencia consistente hacia la acidificación de los suelos intervenidos, asociada a la pérdida de materia orgánica y a la intensificación de las actividades agropecuarias.

Comportamiento de la Materia Orgánica como resultado del cambio de uso.

La materia orgánica (MO) fue la propiedad más afectada por el cambio de uso del suelo. El suelo bajo conservación registró un contenido de 14,6 %, mientras que los sistemas ganadero y agrícola presentaron valores significativamente menores (7,9 % y 5,9 %, respectivamente), equivalentes a pérdidas cercanas al 46 % y 60 % respecto a la condición natural (Figura 2B). El análisis estadístico mostró diferencias significativas ($p < 0,05$) entre la zona de conservación y los usos productivos, aunque no se detectaron diferencias entre agricultura y ganadería.

El elevado contenido de MO en la zona de conservación es característico de los Andisoles de alta montaña, donde las bajas temperaturas, el aporte continuo de biomasa vegetal y la presencia de minerales amorfos derivados de cenizas volcánicas favorecen la acumulación y estabilización del carbono orgánico en el suelo (Burbano-Orjuela, 2016; Mantilla et al., 2018).

La reducción observada en los sistemas productivos evidencia un proceso de degradación asociado al cambio de uso del suelo. En la zona agrícola, la labranza favorece la ruptura de agregados, incrementa la aireación y acelera la mineralización de la materia orgánica, además de reducir el retorno de residuos vegetales al suelo (Brunel y Seguel, 2011; Trutmann, 2002). En la zona ganadera, aunque las excretas aportan carbono y nutrientes, estos ingresos no compensan la pérdida de biomasa original ni los efectos de la compactación sobre los ciclos biogeoquímicos del suelo (Mora et al., 2020).

La disminución de la materia orgánica tiene implicaciones directas sobre la calidad del suelo, ya que reduce su capacidad de retención de nutrientes, estabilidad estructural y capacidad amortiguadora frente a cambios químicos. En consecuencia, los resultados confirman que la transformación de ecosistemas naturales hacia usos agropecuarios constituye uno de los principales factores de pérdida de carbono y deterioro funcional de los suelos ribereños de la Laguna de La Cocha.

Comportamiento de la Capacidad de intercambio catiónico como resultado del cambio de uso.

La capacidad de intercambio catiónico (CIC) presentó valores elevados en los tres usos del suelo, con un rango entre 48,9 y 58,5 meq/100 g (Figura 2C), característico de los Andisoles ricos en materia orgánica y minerales amorfos derivados de cenizas volcánicas (Intagri, 2021). Aunque se observó una tendencia decreciente desde la zona de conservación hacia los sistemas ganadero y agrícola, el análisis estadístico no detectó diferencias significativas entre los usos evaluados ($p > 0,05$).

La disminución numérica de la CIC coincide con la reducción progresiva de la materia orgánica observada en los sistemas productivos, lo que sugiere un efecto del cambio de uso sobre la capacidad de retención de nutrientes. Sin embargo, la ausencia de diferencias significativas indica que, a pesar de la degradación evidenciada en otras propiedades del suelo, los Andisoles aún conservan una elevada capacidad de intercambio debido a la contribución conjunta de la materia orgánica remanente y de los minerales de carga variable presentes en estos suelos (Jordá et al., 2022).

Estos resultados evidencian una cierta resiliencia funcional del sistema edáfico frente al cambio de uso. No obstante, la tendencia descendente observada constituye una señal de alerta, ya que la continua pérdida de materia orgánica podría reducir progresivamente la reserva de fertilidad y comprometer la capacidad del suelo para retener nutrientes a largo plazo (Lagos y Huertas, 2019).

Comportamiento de la Conductividad eléctrica como resultado del cambio de uso.

La conductividad eléctrica (CE) presentó diferencias significativas entre los usos del suelo ($p < 0,05$), aunque todos los valores se mantuvieron dentro del rango de suelos no salinos (<2000 µS/cm) (Figura 2D). La zona ganadera registró la mayor CE (145,5 µS/cm), seguida por la zona de conservación (100,1 µS/cm) y la agrícola (76,3 µS/cm). El mayor valor observado en la zona ganadera puede atribuirse al aporte de sales solubles provenientes de las excretas animales, mientras que los menores valores en la zona agrícola podrían estar asociados a procesos de lixiviación y extracción de nutrientes por los cultivos. En general, los resultados indican que el cambio de uso del suelo genera variaciones en la concentración de sales solubles, aunque sin evidencias de procesos de salinización ni de afectaciones significativas a la calidad química del suelo.

Comportamiento de la Humedad como resultado del cambio de uso.

El contenido de humedad presentó diferencias significativas entre los usos del suelo ($p < 0,05$), registrándose el valor más alto en la zona agrícola (54,8 %), seguido por la zona ganadera (49,5 %) y la zona de conservación (41,1 %) (Figura 2E). Aunque podría esperarse una mayor humedad en el suelo de conservación debido a su elevado contenido de materia orgánica, los resultados evidencian una dinámica distinta asociada al estado estructural del suelo (Chen et al., 2023).

La menor humedad observada en la zona de conservación refleja una condición de drenaje adecuada, favorecida por la alta porosidad y estabilidad estructural características de los Andisoles poco intervenidos. Por el contrario, el incremento de humedad en los sistemas productivos, especialmente en la zona agrícola, sugiere una disminución de la capacidad de infiltración y percolación del agua como consecuencia de la compactación y la alteración de la estructura del suelo (Jakab et al., 2023; B.-Y. Zhang et al., 2025).

Suelos Ecuatoriales 55 (1 y 2): 99-116. https://doi.org/10.47864/se542024p99116

Estos resultados indican que el aumento del contenido de humedad en las zonas intervenidas no representa una mejora en la capacidad de almacenamiento hídrico, sino una evidencia de degradación física asociada al cambio de uso del suelo. La acumulación de agua en los horizontes superficiales coincide con los procesos de compactación, reducción de la porosidad y drenaje deficiente identificados en el análisis morfológico y en las demás propiedades físicas evaluadas.

Comportamiento de la Densidad aparente como resultado del cambio de uso.

La densidad aparente evidenció uno de los efectos más marcados del cambio de uso del suelo sobre la estructura edáfica. El suelo de conservación presentó el valor más bajo (0,30 g/cm³), mientras que la densidad aumentó significativamente en la zona ganadera (0,51 g/cm³) y alcanzó su máximo en la zona agrícola (0,67 g/cm³). El análisis estadístico mostró diferencias significativas entre los tres usos evaluados ($p < 0,05$), evidenciando un gradiente progresivo de compactación asociado a la intensidad de intervención (Figura 2F).

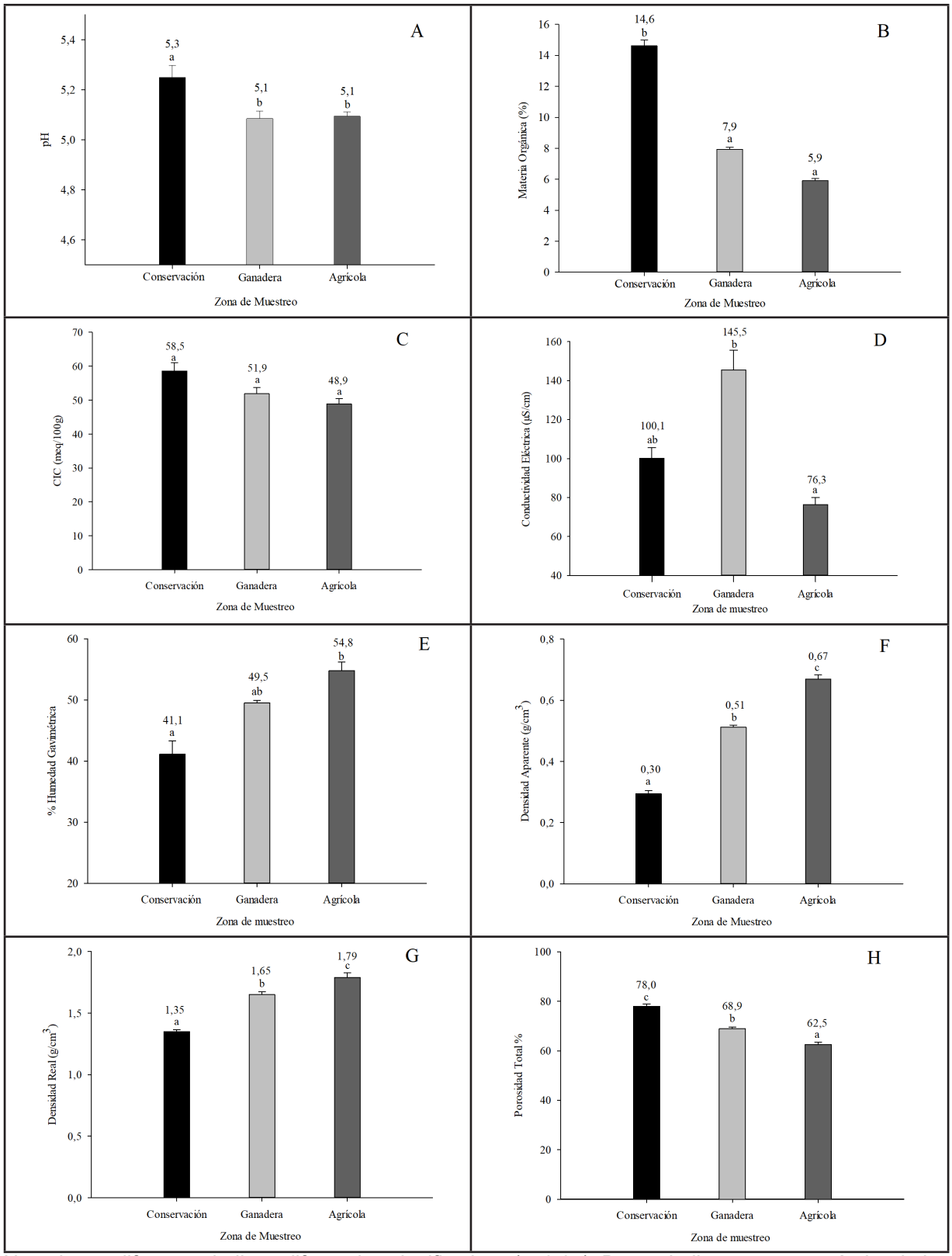
El bajo valor registrado en la zona de conservación es característico de Andisoles poco perturbados, donde el elevado contenido de materia orgánica favorece una estructura estable y altamente porosa (Zúñiga et al., 2018). Por el contrario, el incremento observado en la zona ganadera puede atribuirse al efecto del pisoteo animal, que reduce la macroporosidad y favorece la compactación del suelo (Dörner et al., 2023). La mayor densidad aparente registrada en la zona agrícola refleja un estado más avanzado de degradación física, asociado a la pérdida de materia orgánica y a la alteración de la estructura del suelo por las labores de preparación y manejo del cultivo (Jiménez y Khalajabadi, 2005). Este comportamiento coincide con los mayores contenidos de humedad y la menor porosidad observados en este sistema, evidenciando una reducción de la capacidad de infiltración y drenaje del suelo.

La magnitud del cambio es particularmente relevante al considerar la naturaleza volcánica del suelo. Respecto a la zona de conservación (0,30 g/cm³), la densidad aparente aumentó aproximadamente 70 % bajo ganadería (0,51 g/cm³) y 123 % bajo agricultura (0,67 g/cm³), con diferencias estadísticas entre los tres usos. Por tanto, la interpretación no debe basarse en comparar estos valores con umbrales genéricos de suelos minerales, sino en el desplazamiento respecto a la condición de referencia del propio Andisol. Dörner et al., (2023) y Dörner et al., (2022) demostraron experimentalmente en un Andosol que incrementos de densidad aparente desde 0,64 hasta 0,82 Mg/m³, aun manteniéndose por debajo de 0,9 Mg/m³, estuvieron acompañados por disminución de poros gruesos y permeabilidad al aire e incremento de la resistencia a la penetración y del esfuerzo de precompresión. En consecuencia, un valor absoluto de densidad aparente aparentemente bajo no excluye compactación ni degradación física en suelos derivados de cenizas volcánicas.

Comportamiento de la Densidad real como resultado del cambio de uso.

La densidad real presentó diferencias significativas entre los usos del suelo ($p<0,05$), aumentando desde 1,35 g/cm³ en la zona de conservación hasta 1,65 g/cm³ y 1,79 g/cm³ en las zonas ganadera y agrícola, respectivamente (Figura 2G). Este comportamiento refleja la disminución progresiva del contenido de MO en los sistemas productivos, ya que la fracción orgánica posee una densidad menor que la fracción mineral del suelo (Ruehlmann, 2020). En consecuencia, el incremento de la densidad real constituye una evidencia adicional de la pérdida de carbono orgánico asociada al cambio de uso del suelo.

Figura 2. Comportamiento del suelo en las tres zonas de estudio.



Nota: letras diferentes indican diferencias significativas (p≤0.05). Barras indican ± error estándar de los datos.

Comportamiento de la Porosidad total como resultado del cambio de uso.

La porosidad total disminuyó significativamente con la intensificación del uso del suelo ($p<0,05$), pasando de 78,0 % en la zona de conservación a 68,9 % y 62,5 % en las zonas ganadera y agrícola, respectivamente (Figura 2H). Los tres usos presentaron diferencias estadísticas significativas, evidenciando un gradiente progresivo de degradación física.
La elevada porosidad observada en la zona de conservación está relacionada con el alto contenido de MO y la estabilidad estructural característica de los Andisoles de alta montaña (Llambí et al., 2012). La pérdida de porosidad observada en los sistemas intervenidos coincide con el incremento de la densidad aparente y los mayores contenidos de humedad registrados, confirmando un deterioro de la estructura del suelo que puede afectar procesos como la infiltración, el drenaje y el desarrollo radicular (González et al., 2012; Daza et al., 2014).

La elevada porosidad total observada en los tres usos corresponde a una característica propia de los Andisoles; en consecuencia, su magnitud absoluta no debe interpretarse como indicadora de ausencia de compactación. Lo relevante es la disminución significativa desde 78,0 % en conservación hasta 68,9 % en ganadería y 62,5 % en agricultura, equivalente a una pérdida relativa cercana al 20 % entre conservación y agricultura. Dörner et al., (2023) y observaron un patrón comparable: el aumento de densidad aparente por compactación redujo la porosidad total de 72 a 63 %, pero, de manera más importante, disminuyó el volumen de poros gruesos y la permeabilidad al aire. Esto indica que la degradación puede expresarse primero como una pérdida de la funcionalidad del sistema poroso, aun cuando la porosidad total permanezca numéricamente alta (Dörner et al., 2022). En este estudio no se midieron infiltración, conductividad hidráulica ni estabilidad de agregados; por ello, no se afirma una cuantificación directa de estos procesos. Sin embargo, la convergencia entre mayor densidad aparente, menor porosidad total, mayor humedad superficial, pérdida de materia orgánica y rasgos de drenaje deficiente constituye evidencia consistente de degradación física asociada al uso del suelo.

Índice dC/dB y fragilidad asociada al uso del suelo.

El índice dC/dB mostró un gradiente marcado entre usos: 0,64 en conservación, 0,20 en ganadería y 0,12 en agricultura. Paralelamente, el carbono orgánico disminuyó de 8,46 % en conservación a 4,58 % y 3,42 % en ganadería y agricultura, respectivamente, mientras que la densidad aparente aumentó de 0,30 a 0,51 y 0,67 g/cm³. En conjunto, el dC/dB disminuyó 68,8 % bajo ganadería y 81,3 % bajo agricultura respecto a la referencia de conservación, evidenciando una reducción progresiva del margen funcional del suelo frente a la intensificación del uso.

Tabla 4. Carbono orgánico, densidad aparente e índice dC/dB según uso del suelo.

Uso del suelo	CO (%)	Da (g/cm³)	dC/dB
Zona de conservación	8,468	0,30	0,64
Zona ganadera	4,582	0,51	0,20
Zona agrícola	3,422	0,67	0,12

El valor de 0,12 registrado en el suelo agrícola debe interpretarse como una señal de alta fragilidad y no como una demostración directa de irreversibilidad. La propuesta conceptual de Clunes et al., (2022) establecen que la fragilidad aumenta a medida que el suelo pierde capacidad de resiliencia frente a las presiones antrópicas, mientras que la implementación posterior del índice dC/dB en suelos volcánicos ha identificado valores bajos (≤0,10–0,12, según la región evaluada) en condiciones frágiles que requieren protección para evitar aproximarse al punto de no retorno (Zúñiga et al., 2025). Aunque estos umbrales deben validarse localmente antes de adoptarse como límites universales, la coincidencia del valor obtenido para el suelo agrícola con dicho intervalo, junto con la pérdida del 60 % de materia orgánica, el incremento del 123 % en la densidad aparente y la reducción de la porosidad, evidencia que este uso presenta el menor margen de resiliencia y la mayor vulnerabilidad frente a una degradación difícil de revertir si continúa el sobreuso. Estos resultados adquieren especial relevancia en el contexto del objetivo central de este estudio, orientado a determinar si las actividades socioeconómicas desarrolladas en la zona ribereña están afectando las propiedades del suelo y, consecuentemente, su capacidad para sostener funciones y servicios ecosistémicos esenciales.

En particular, la pérdida de materia orgánica y carbono compromete la función del suelo como reservorio de carbono, mientras que el incremento de la densidad aparente, la reducción de la porosidad y las alteraciones en el contenido de humedad evidencian cambios estructurales que pueden afectar la infiltración, el almacenamiento y la circulación del agua en el perfil (Beillouin et al., 2023). Por tanto, la degradación observada no representa únicamente una modificación de propiedades fisicoquímicas aisladas, sino una pérdida progresiva de la capacidad funcional del suelo para contribuir a la regulación hidrológica y al almacenamiento de carbono. Esta condición resulta especialmente preocupante en los suelos ribereños de la Laguna de La Cocha, donde dichas funciones son fundamentales para regular los flujos de agua, sedimentos y nutrientes hacia el humedal y para mantener la integridad ecológica de un ecosistema de importancia internacional. En este sentido, la elevada fragilidad identificada en el suelo agrícola constituye una señal de alerta frente a la intensificación de las actividades productivas que posteriormente se evidencian en el análisis socioeconómico y espacial del territorio.

Relación de las actividades socioeconómicas y el comportamiento de las propiedades fisicoquímicas

Los ecosistemas ribereños en la vereda El Motilón han sido intervenidos por la población a causa del desarrollo de diferentes actividades productivas como ganadería no intensiva y agricultura con cultivos de papa, cebolla, mora, repollo, acelga, tomate y otras especies, debido al crecimiento poblacional, las comunidades requieren mayores ingresos y recursos que han llevado a la invasión de las zonas de conservación ubicadas en la ribera de la laguna de La Cocha (Martínez y Narváez, 2017).

En relación a lo anterior estos análisis revelan un profundo proceso de transformación del paisaje en la vereda El Motilón, impulsado por la expansión de las actividades socioeconómicas como se puede observar en la Figura 3.

En 2002, el paisaje aún conservaba áreas significativas de ecosistemas naturales, con una notable cobertura de "Bosque denso alto de tierra firme" y "Arbustal abierto" que dominaban las partes altas y medias de la vereda. La actividad humana se concentraba

Suelos Ecuatoriales 55 (1 y 2): 99-116. https://doi.org/10.47864/se542024p99116

en un "Mosaico de pastos y cultivos" a lo largo de la ribera de la laguna.

Para el año 2020, este escenario cambió drásticamente. Las áreas de bosque denso y arbustal se vieron severamente reducidas y fragmentadas, siendo reemplazadas por "Vegetación secundaria" y de forma notable, por "Pastos limpios". Esto evidencia un claro proceso de deforestación y expansión de la frontera ganadera hacia zonas de mayor pendiente. Simultáneamente, el área ribereña muestra una intensificación del uso del suelo, con una mayor especialización y una clara dominancia de los sistemas agropecuarios sobre los remanentes de vegetación natural.

La transformación del paisaje en la vereda El Motilón, evidenciada por la pérdida significativa de cobertura forestal y la intensificación de las actividades agrícolas y pecuarias en las últimas dos décadas, constituye el principal factor causal de los procesos de degradación del suelo observados en este estudio. La reducción superior al 50% en los contenidos de materia orgánica, el incremento de más del 120% en la compactación del suelo, así como las alteraciones en el pH y en el régimen hídrico, representan indicadores medibles y directamente asociados al cambio en el uso y manejo del territorio. Por lo tanto, los resultados fisicoquímicos deben entenderse como la "huella edáfica" de las presiones socioeconómicas que han remodelado el ecosistema de la vereda El Motilón en el período analizado y que puede ser el reflejo de lo que puede estar sucediendo en la rivera de toda la laguna de La Cocha en donde se realizan este tipo de actividades.

Por consiguiente, el desconocimiento del funcionamiento y la importancia de estos ecosistemas es una de las causas de la introducción de prácticas agrícolas que se desarrollan en zonas cercanas a la laguna, provocando cambios ambientales y modificación del paisaje. La zona ribereña enfrenta problemas ambientales dentro de los cuales se encuentra la presión de la tierra por fragmentación y desestabilización de la agricultura campesina y la ganaderización que conducen a la degradación del funcionamiento original y la provisión de beneficios ambientales (Corponariño, 2007).

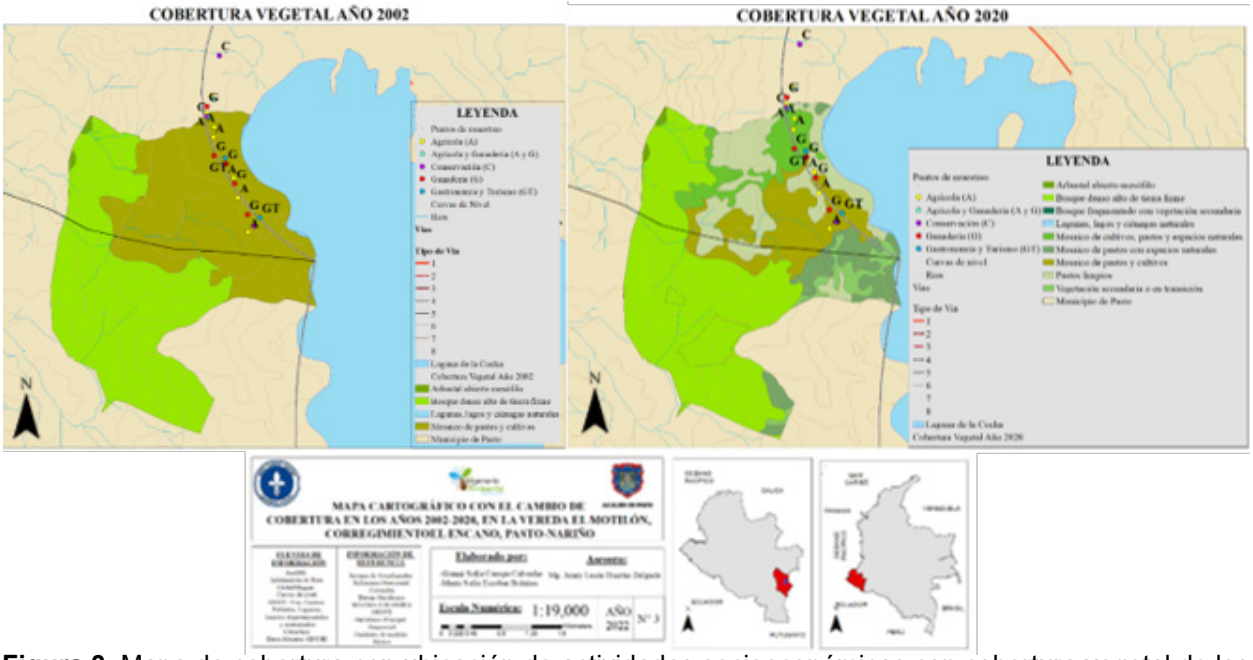


Figura 3. Mapa de cobertura con ubicación de actividades socioeconómicas con cobertura vegetal de los años 2002 y 2020. **Fuente de consulta:** datos tomados del SINCHI.

En la Figura 3, se observa que los puntos de las actividades socioeconómicas que se realizan en la zona, se ubican sobre el uso o vocación de “Zona de Agricultura Sostenible”, por lo que se puede inferir que el uso actual no se desempeña de manera adecuada ya que las actividades que se desarrollan en las zonas ribereñas principalmente las prácticas agrícolas no son ecológicas y no se respeta el recurso suelo, aire y agua, de la misma manera se afecta los derechos y la salud de los agricultores (Earth Observing System, 2021).

Conflicto de uso del Suelo.

El análisis de la planificación territorial oficial añade una capa final y crítica para la comprensión de la degradación del suelo en la vereda El Motilón. Al superponer los usos actuales del suelo sobre el mapa de zonificación del Plan de Ordenamiento Territorial (POT) del municipio de Pasto (2015), emergen un claro y severo conflicto de uso del suelo (Figura 4).

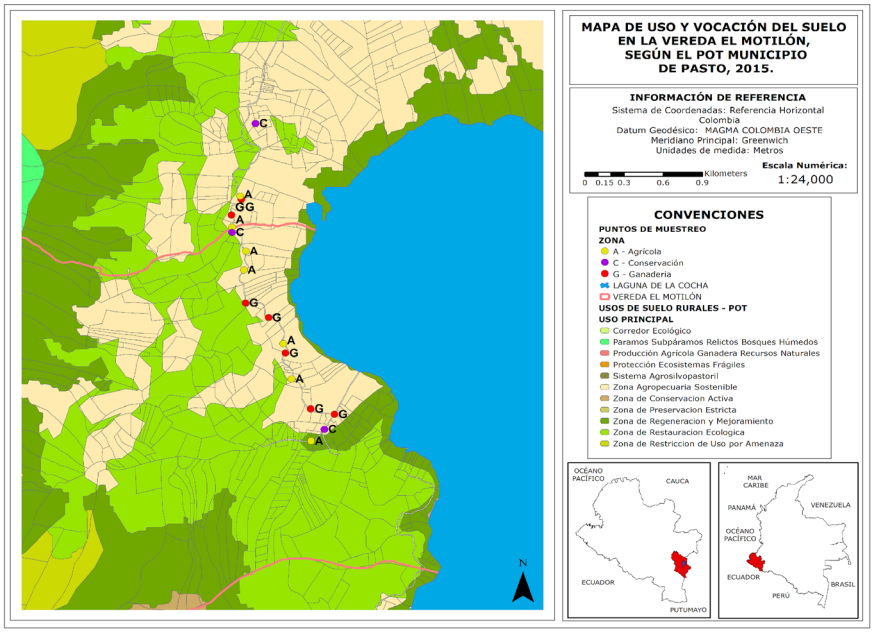


Figura 4. Mapa de uso y vocación del suelo en la vereda El Motilón, según el POT Municipio de Pasto, 2015.

El primer y más profundo conflicto reside en la brecha entre la norma y la práctica. La franja ribereña, donde se concentran las actividades agrícolas y ganaderas, está zonificada como "Zona Agropecuaria Sostenible". El término "sostenible" implica un manejo que mantiene o mejora la salud del suelo a largo plazo, asegurando su productividad y sus funciones ecológicas (Aldaz Lusarreta, 2024). Sin embargo, los resultados de este estudio demuestran precisamente lo contrario. Las prácticas actuales son insostenibles, ya que están degradando activamente la base de recursos naturales que el propio POT busca proteger.

El segundo conflicto se evidencia al comparar el POT con la dinámica de cambio de cobertura 2002-2020. Se observa una clara presión de la frontera agropecuaria que se expande desde la "Zona Agropecuaria Sostenible" hacia las zonas adyacentes de "Preservación Estricta" y "Corredor Ecológico". Esto indica que no solo las prácticas dentro del área permitida son inadecuadas, sino que además se están invadiendo y degradando las áreas de máxima protección.

Por lo tanto, la degradación del suelo en la vereda El Motilón es la consecuencia directa

Suelos Ecuatoriales 55 (1 y 2): 99-116. https://doi.org/10.47864/se542024p99116

de este doble conflicto: (i) la falta de adopción de prácticas verdaderamente sostenibles en las áreas designadas para ello, y (ii) el incumplimiento de los límites de las zonas de conservación.

CONCLUSIONES

Las actividades agrícolas y ganaderas desarrolladas en las zonas ribereñas de la Laguna de La Cocha modificaron significativamente las propiedades fisicoquímicas del suelo respecto a la condición de conservación. La disminución del pH, la materia orgánica y la porosidad, junto con el incremento de la densidad aparente y de la humedad, evidenció un gradiente de alteración asociado con la intensidad de uso. La agricultura presentó la condición más afectada, mientras que la ganadería mostró un nivel intermedio de degradación, relacionado principalmente con procesos de compactación y alteración de la estructura del suelo.

La incorporación del concepto de fragilidad permitió interpretar estos cambios desde una perspectiva funcional. La disminución del índice dC/dB desde 0,64 en conservación hasta 0,20 en ganadería y 0,12 en agricultura evidencia una reducción progresiva del margen de resiliencia del suelo frente a las presiones antrópicas. El sistema agrícola presentó la condición de mayor fragilidad, lo que indica una menor capacidad de recuperación ante la continuidad o intensificación del sobreuso y una posible aproximación a condiciones de difícil reversibilidad. No obstante, los umbrales asociados con un eventual punto de no retorno deben ser validados para las condiciones locales antes de considerarse límites absolutos.

El análisis multitemporal evidenció una expansión progresiva de las actividades agropecuarias sobre coberturas naturales entre 2002 y 2020, particularmente mediante el aumento de pastos y áreas productivas. Esta transformación espacial coincide con los patrones de alteración observados en las propiedades del suelo y revela un conflicto entre el uso actual del territorio, las zonas destinadas a agricultura sostenible y las áreas de preservación y conectividad ecológica establecidas en la planificación territorial.

El gradiente observado en el índice dC/dB, junto con la pérdida de materia orgánica, el incremento de la densidad aparente y la reducción de la porosidad, evidencia que la intensificación de las actividades socioeconómicas no solo modifica propiedades fisicoquímicas individuales, sino que disminuye progresivamente la resiliencia y funcionalidad del suelo. Estas alteraciones pueden comprometer servicios ecosistémicos fundamentales, particularmente la regulación hidrológica y el almacenamiento de carbono, esenciales en los suelos ribereños de la Laguna de La Cocha por su papel en la regulación de los flujos de agua, sedimentos y nutrientes hacia el humedal. En este contexto, la elevada fragilidad identificada en el suelo agrícola constituye una señal de alerta que justifica el fortalecimiento de estrategias de manejo sostenible, restauración ecológica y ordenamiento territorial orientadas a conservar la integridad funcional de este ecosistema de importancia internacional.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Universidad Mariana y al Programa de Ingeniería Ambiental por el apoyo académico y logístico brindado durante el desarrollo de esta investigación. Asimismo, expresan su gratitud al laboratorio de la sede Alvernia por facilitar los espacios, equipos y materiales requeridos para los análisis fisicoquímicos del suelo. Se agradece también a la comunidad de la vereda El Motilón, corregimiento de El Encano, por permitir el acceso a las áreas de muestreo.

REFERENCIAS

Abanto-Rodríguez, C., Guerra Blas, J. C., del Castillo Torres, D., Ramírez-Flores, N., García Soria, D. G., Moya Ambrosio, M. F., Arévalo, H. G., Arévalo, W. F. G., Bravo Nieto, J. A., Panduro Tenazoa, N. M., Sakasaki, R. T., Monteiro Neto, J. L. L., Revilla-Chávez, J. M., & Murga-Orrillo, H. (2026). Soil functioning indicators decline with land-use intensification in the Peruvian Amazon: Evidence from Ucayali. Frontiers in Soil Science, 6, 1741629. https://doi.org/10.3389/fsoil.2026.1741629

Aldaz Lusarreta, A. (2024). Hacia un manejo sostenible del recurso agua-suelo: Evaluación de sensores de potencial hídrico y de una innovadora gestión del suelo y cultivo en Navarra. https://academica-e.unavarra.es/handle/2454/50273

Brunel, N., & Seguel, O. (2011). EFECTOS DE LA EROSIÓN EN LAS PROPIEDADES DEL SUELO. Agro Sur, 39(1), Article 1. https://doi.org/10.4206/agrosur.2011.v39n1-01

Burbano-Orjuela, H. (2016). The soil and its relationship with ecosystem services and food security. Revista de Ciencias Agrícolas, 33(2), 117-124. https://doi.org/10.22267/rcia.163302.58

Chen, Y., Liu, X., Ma, Y., He, J., He, Y., Zheng, C., Gao, W., & Ma, C. (2023). Variability analysis and the conservation capacity of soil water storage under different vegetation types in arid regions. CATENA, 230, 107269. https://doi.org/10.1016/j.catena.2023.107269

Corponariño. (2007). TOMO I Introducción, Descripción General, Marco Conceptual Y Metodológico: Proyecto Estado del Arte de la Información Biofísica y Socioeconómica de los Páramos de Nariño. https://corponarino.gov.co/expedientes/intervencion/biodiversidad/tomo01introducion.pdf

Crosara, A. 2016. «Color de Suelo».

Curtin, D., & Trolove, S. (2013). Predicting pH buffering capacity of New Zealand soils from organic matter content and mineral characteristics. Soil Research, 51(6), 494-502.

Daza, M., Flórez, F., & Triana, F. (2014). Efecto del Uso del Suelo en la Capacidad de Almacenamiento Hídrico en el Páramo de Sumapaz—Colombia. Revista Facultad Nacional de Agronomía, 67, 7189-7200. https://doi.org/10.15446/rfnam.v67n1.42642

Dörner, J., Bravo, S., Clunes, J., Horn, R., Dec, D., Valle, S., Zuñiga, F., Wendroth, O., & Werth, J. (2023). Assessing Temporal Changes of the Soil Mechanical Strength of a Volcanic Ash Soil at Different Bulk Densities Under Pasture. Journal of Soil Science and Plant Nutrition, 23(2), 2007-2017. https://doi.org/10.1007/s42729-023-01155-0

Dorronsoro, C. 2016. Introducción a la Edafología. El suelo y sus propiedades. Universidad de Granada, España.

Earth Observing System. (2021, abril 23). Agricultura Intensiva: Características Y Posibles Soluciones. Agricultura. https://eos.com/es/blog/agricultura-intensiva/

Estupiñán, LH, Gómez, JE, … Limas, LF (2009). Efecto de actividades agropecuarias en las características del suelo en el Páramo el Granizo, (Cundinamarca - Colombia). Revista UDCA Actualidad & Divulgación Científica, 12 (2). https://doi.org/10.31910/rudca.v12.n2.2009.694

González, J. L., González, G., & Chávez, E. (2012). Porosidad del suelo en tres superficies típicas de la cuenca alta del río Nazas. Tecnología y ciencias del agua, 3(1), 21-32.

IGAC. 2017. «Recomendaciones para la toma de muestras para análisis del laboratorio nacional de suelos».

Intagri. (2021). La Capacidad de Intercambio Catiónico del Suelo. Instituto para la Innovación Tecnológica en Agricultura. https://www.intagri.com/articulos/suelos/la-capacidad-de-intercambio-cationico-del-suelo

Jakab, G., Madarász, B., Masoudi, M., Karlik, M., Király, C., Zacháry, D., Filep, T., Dekemati, I., Centeri, C., Al-Graiti, T., & Szalai, Z. (2023). Soil organic matter gain by reduced tillage intensity: Storage, pools, and chemical composition. Soil and Tillage Research, 226, 105584. https://doi.org/10.1016/j.still.2022.105584

Jiménez, A. S., & Khalajabadi, S. S. (2005). La densidad aparente y su relación con otras propiedades en suelos de la zona cafetera colombiana. 17.

Jordá, J. D., Tent-Manclús, J. E., Cerdán, M., Sánchez-Sánchez, A., Jaramillo, P., & Jordán, M. M. (2022). Characterisation of clays from Alicante province (SE Spain) for use in the recovery of degraded soils. Environmental Geochemistry and Health, 44(1), 247-255. https://doi.org/10.1007/s10653-021-00925-y

Lagos, J., & Huertas, J. (2019). Efectos de una enmienda orgánica sobre las propiedades fisicoquímicas de un Andisol, en Túquerres, Nariño, Colombia. Agro Sur, 47(3), 39-54. https://doi.org/10.4206/agrosur.2019.v47n3-05

Llambí, L. D., Célleri, R., De Bièvre, B., Ochoa, B., Borja, P., & Soto-Werschitz, I. (2012). Ecología, hidrología y suelos de páramos: Páramos andinos. Proyecto Páramo Andino, FONAG y USAID.

López Martínez, Mery Liliana, & Madroñero Palacios, Sandra Milena. (2015). ESTADO TRÓFICO DE UN LAGO TROPICAL DE ALTA MONTAÑA: CASO LAGUNA DE LA COCHA. Ciencia e Ingeniería Neogranadina, 25(2), 21-42. https://doi.org/10.15665/re.v13i1.348

Mantilla, G., De la Torre, L., Gómez, C., Ordoñez, N., Ceballos, J., Euscátegui, C., Perez, S., Martínez, N., Sánchez, R., Maldonado, N., Gaitán, J., Chávez, L., Chamorro, C., & Flórez, A. (2018). Los Suelos: Estabilidad, productividad y degradación. En El Medio Ambiente en Colombia (pp. 229-277).

Martínez, E. A., & Narváez, N. O. (2017). Apropiación social de una tecnología no convencional para el tratamiento del agua en la vivienda, vereda el Motilón, Pasto (Nariño). https://hdl.handle.net/11059/7923

Mora, M., Pescador, L., Ramos, L., & Charry, J. (2020). Impacto De La Actividad Ganadera Sobre El Suelo En Colombia. StuDocu. https://www.studocu.com/co/document/universidad-nacional-de-colombia/ecologia/dialnet-impacto-de-la-actividad-ganadera-sobre-el-suelo-en-colombia-6098075/8949336

Quichimbo, P., Tenorio, G., Borja, P., Cárdenas, I., Crespo, P., & Célleri, R. (2012). Efectos sobre las propiedades físicas y químicas de los suelos por el cambio de la cobertura vegetal y uso del suelo: páramo de Quimsacocha al sur del Ecuador. Suelos Ecuatoriales, 42(2), 138-153.

Romero-Ruiz, A., Monaghan, R., Milne, A., Coleman, K., Cardenas, L., Segura, C., & Whitmore, A. P. (2023). Modelling changes in soil structure caused by livestock treading. Geoderma, 431, 116331. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2023.116331

Ruehlmann, J. (2020). Soil particle density as affected by soil texture and soil organic matter: 1. Partitioning of SOM in conceptional fractions and derivation of a variable SOC to SOM conversion factor. Geoderma, 375, 114542. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114542

Sadzawka, A., Carrasco, M. A., Grez, R., Mora, M. L., Flores, H., & Neaman, A. (2006). Métodos de análisis recomendados para los suelos de Chile. Revisión 2006 (Serie Actas INIA N.° 34). Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA).

Soil Survey Staff. 2006. Keys to Soil Taxonomy. 10th ed. USDA-Natural Resources Conservation Service, Washington, D.C., USA. 341 p.

Trutmann, P. (2002). Guia Salud de Suelos: Un manual para cuidar el salud de los suelos para Promotores, Productores y Extensionistas. John Reily, Alfredo Rueda and Peter Trutmann Eds. 2002. Cornell University, Ithaca NY. USA. A guide for 'promotores' by Cornell University, Zamorano faculty and NGOs working in the field.Publisher,Orton.catie.ac.c. https://www.academia.edu/2241008/Guia_Salud_de_Suelos_Un_manual_para_cuidar_el_salud_de_los_suelos_para_Promotores_Productores_y_Extensionistas

Varón-Ramírez, V. M., Araujo-Carrillo, G. A., & Guevara Santamaría, M. A. (2022). Colombian soil texture: Building a spatial ensemble model. Earth System Science Data, 14(10), 4719-4741. https://doi.org/10.5194/essd-14-4719-2022

Zhang, B.-Y., Dou, S., Guo, D., & Guan, S. (2025). Reduced soil water repellency suggests the need for timely replenishment of soil organic matter in long-term traditional farming. Soil and Tillage Research, 247, 106381. https://doi.org/10.1016/j.still.2024.106381

Zúñiga Ugalde, F., Huertas Delgado, J., Guerrero Obando, G., Dörner Fernández, J., Sarasty Bravo, J., & Burbano Orjuela, H. (2018). Propiedades morfológicas de los suelos asociadas a los ecosistemas de Páramo, Nariño, Sur de Colombia. REVISTA TERRA LATINOAMERICANA, 36(2), 183. https://doi.org/10.28940/terra.v36i2.363

SUELOS ECUATORIALES

Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo

https://doi.org/10.47864/se552025p117130

El cambio climático y su incidencia en la propagación de la Plaga *Carmenta foraseminis* en el cultivo de cacao (*Teobroma cacao* L.)

Climate change and its impact on the spread of the *Carmenta foraseminis* pest in cocoa cultivation (*Theobroma cacao* L.)

Wilmer Valenzuela Molina[1*] ✉, Armando Torrente Trujillo[2], Jorge Iván Chávarro Diaz[3]

[1*] Ingeniero Agroecologo, Joven Innovador e investigador Colciencias, Centro de Investigación en Ciencias y Recursos GeoAgroAmbientales – CENIGAA
[2] Ing. Agrícola. Doctor en Ciencias Agropecuarias - CENIGAA
[3] Ing. Agrícola. M.Sc. Hidrociencias - CENIGAA

Vol. 55 (1 y 2) de 2025 | pp: 117-130 | ISSN 0562-5351 E-ISSN 2665-6558 | REC.: 05/06/2026 - ACEP.: 01/08/2026

RESUMEN

El propósito es analizar a manera de reflexión el proceso incremental de la Mariposa Plaga Carmenta negra (Carmenta foraseminis) en el sistema productivo de cacao en el Departamento del Huila en el sur de Colombia, identificando desde las dinámicas poblacionales su desplazamiento y la incidencia de esta plaga durante los últimos años. En este escrito se abordan los temas relacionados con la ineficiencia en el control de la plaga, cómo el cambio climático a escala regional se relaciona con su tendencia creciente, y de esta manera comprender y estimar los efectos de la especie en el Huila, para así aportar a la toma de decisiones relacionadas con la mitigación y adaptación al cambio climático y sus impactos en el subsector del cacao.

Palabras clave: Cambio climático, Plaga, *Carmenta foraseminis*, Cacao, Huila.

ABSTRACT

The purpose is to analyze as a reflection the incremental process of the Black Carmenta Pest Butterfly (Carmenta foraseminis) in the cocoa production system in the Department of Huila in southern Colombia, identifying from the population dynamics its displacement and the incidence of this plague in recent years. This paper addresses issues related to inefficiency in pest control, how climate change at a regional scale is related to its growing trend, and in this way understand and estimate the effects of the species in Huila, to thus contributing to decision-making related to mitigation and adaptation to climate change and its impacts on the cocoa subsector.

Keywords: Climate change, Pest, *Carmenta foraseminis*, Cocoa, Huila.

INTRODUCCIÓN

Un Problema Latente

El sistema productivo de cacao (*Theobroma cacao*), es un cultivo que para el Departamento del Huila en el sur de Colombia se consolida como un pilar para el desarrollo socioeconómico (Cobaleda, 2022), la mayoría de los cultivos productivos se encuentran ubicados en el Valle del Río Magdalena entre 500 a 900 m.s.n.m (Graterón, 2020). y representa la tradición de la economía. Los cacaocultores vienen enfrentando y adaptándose a diferentes problemas de manejo relacionadas a la aparición de plagas y enfermedades en el cultivo (Cuellar, 2021), que, en su mayoría según cifras del Instituto Colombiano Agropecuario ICA, de acuerdo con el número de hectáreas afectadas las tres principales enfermedades por nivel de daño potencial son las producidas por los hongos *phitopthora, monilia y rosellinia* (MADR, 2004). Sin embargo, estas vienen cambiando en el tiempo, porque anteriormente las enfermedades principales eran *Moniliasis, Ceratocystis* y Escoba de Bruja (Barros, 1972).

Las principales actividades de manejo asociadas a estas enfermedades resultan de la implementación de labores de tipo cultural en la primera instancia (Cerón, 2023), que han sido en algunos casos eficientes al poder controlarlas (Brand, 2014). Sin embargo, en la última década se ha dado la aparición de una plaga tipo mariposa llamada Carmenta negra (*Carmenta foraseminis*) (Ramírez et al., 2020), que ha causado problemas mayores por su alta incidencia en la perforación de mazorcas de cacao con pérdidas del 23.5% en el cacao húmedo y de hasta el 55.3% en el cacao seco (Muñoz, Vásquez, & Muriel, 2017). Lo anterior, sumado al desconocimiento de la plaga, motivo que ha hecho que los cacaocultores empiecen a implementar prácticas de manejo que no han resultado eficientes (Osorio, 2022).

REFLEXIÓN

Agroecología del Cultivo de Cacao

El cultivo de cacao en un sistema productivo que requiere de unas condiciones agroclimáticas y edáficas específicas para su buen desarrollo vegetativo, acompañado de labores culturales que garanticen su rendimiento y rentabilidad (Osorio, 2021). En orden de importancia para el cacao, las condiciones edáficas son las que priman al garantizar el desarrollo radicular, la nutrición y cantidad de elementos tolerantes (Rojas et al., 2021), seguido de las agroclimáticas que generan un estrés directo sobre el cultivo, que resulta en los procesos ecofisiológicos dando aptitudes mediante una respuesta que puede ser favorable o desfavorable (Osorio, 2021). En algunos casos las condiciones ambientales generan estrés afectando el crecimiento, productividad, supervivencia y la reproducción de las plantas (Varela, 2011). Por ejemplo, el factor especifico climático que más afecta el desarrollo de frutos, floración y desarrollo vegetativo es la temperatura (Almeida & Valle, 2007), estimulando o reprimiendo los procesos fisiológicos.

La combinación de las condiciones edáfica y agroclimáticas permite ordenar y definir espacialmente el lugar en el que el cultivo puede desarrollarse sin grandes limitaciones (Alarcón, 2021). Las tierras óptimas para el cultivo de cacao en el departamento del Huila son 4.435 ha, suelos que reúnen la mayoría de condiciones necesarias (Ramírez et al., 2020), sumado a que tienen una precipitación entre los 1.800 y 2.600 mm/año; 152.190 ha se clasifican como tierras moderadas por sus características climáticas (disponibilidad de agua y temperatura) (Peraza, 2022, p 61), 670.791 ha son tierras que tienen problemas al no tener un área efectiva en la penetrabilidad de las raíces, sumado al limitante de la temperatura y abundante precipitación, y 897.847 ha no cumplen con las condiciones requeridas (García, Romero, & Ortiz, 2005).

Suelos Ecuatoriales 55 (1 y 2): 117-130. https://doi.org/10.47864/se552025p117130

Según el Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural – MADR (2021), el Departamento del Huila ocupa la cuarta posición en el País en área sembrada de Cacao con 11.940 ha, con una producción primaria de 4.312 toneladas y un rendimiento de 0,42 t/ha, contrastando el área sembrada con las tierras óptimas para el cultivo, se halla la mitad de las plantaciones de cacao en tierras moderadas con alguna limitante (Ramírez et al., 2020), sumado a la reducción del área apta en un 2,1%, causado por el cambio climático, esto por los efectos indirectos como son el aumento de dióxido de carbono, combinación de precipitación y temperatura, proliferación de enfermedades en cultivos, y el aumento en la temperatura, que genera dificultad en la planificación de actividades relacionadas al manejo del cultivo, porque los periodos secos y/o lluviosos presentan variabilidad en su duración e intensidad (Huila, CAM, USAID, FCMSC, & Ecología, 2014).

Cambio climático

En la actualidad el cambio climático es un tema que ocupa diferentes agendas a nivel mundial (Ortiz-Torres, 2022), es definido por el grupo de expertos como cualquier cambio de clima con el tiempo, relacionado a las actividades humanas o con la variabilidad natural, razón por la que el cambio climático resulta difícil de describir al ser de causa natural y artificial, motivo que da a entender que este fenómeno se relaciona con todo (Nze Asue et al., 2023). Según (UN, 2019), el cambio climático es dependiente de la concentración de Gases de efecto Invernadero (GEI) y ésta a su vez repercute directamente con la temperatura media mundial; razón por la cual la relación de las dinámicas climáticas con el entorno natural está fuertemente ligada, ya que los cambios externos afectan directamente a los cuerpos expuestos (Correa, 2023).

Para el departamento del Huila en el año 2014, se realizó el plan para la preparación al cambio climático 2050, que pronostica las tendencias y cambios relacionados al clima (Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales [IDEAM], 2014).De manera general se pronostica un aumento de 2ºC en la temperatura media anual, así como la disminución de precipitaciones, esto concuerda con datos del IDEAM que pronostica para el año 2040 un incremento de 2ºC de temperatura media y una disminución del 30% en precipitaciones (Huila, CAM, USAID, FCMSC, & Ecología, 2014). En el año 2018, en el informe de seguimiento a la variabilidad climática y cambio climático en Colombia, en los tres patrones climatológicos se encontró que el Norte del Huila es un núcleo anómalo, ya que en comparación con el resto del Departamento y alrededores, presenta una temperatura media anual del aire superior a 28ºC, así mismo con precitaciones bajas entre los 500 y 1000 milímetros anuales, junto con una humedad relativa media anual baja (menor al 70%) (IDEAM & UNAL, 2018).

El cambio climático en el Huila es un fenómeno preocupante, ya que en intervalos cortos de tiempo se manifiestan variaciones climáticas extremas; esta se define según (CENIGAA, CORHUILA, & Huila, 2018), como las variables meteorológicas que tienden a igualar o a superar los valores máximos y mínimos históricos en todas las escalas temporales y espaciales, siendo la temperatura y la precipitación, los elementos del clima que más varían. En el norte del Departamento del Huila, en los periodos de sequía, la temperatura tiende a aumentar y la precipitación a disminuir, mientras que en los periodos de lluvia ocurre lo contrario con valores extremos (Ramírez et al., 2020). El IDEAM reportó que en los Municipios del nororiente del Huila (Campoalegre, Hobo, Rivera), las lluvias resultaron muy por debajo de lo normal, entre el 0 al 40%, así mismo la temperatura aumentó entre 0.5 y 1.5ºC en los Municipios de Neiva, Rivera y Campoalegre.

En el mismo informe se predice una anomalía de temperatura máxima de 1ºC (IDEAM I. d., 2020).

Carmenta Negra

En el año 1995 fue descrito el lepidóptero C*armenta foraseminis* por Eichlin, mediante la crianza del insecto en las semillas de la planta membrillo (*Gustavia* sp), planta que se considera hospedera (Delgado, 2005), junto con frutos de cacao procedentes de Colombia, el nombre procede del latín Foro = aburrir y Seminis = semilla, que se relaciona con su afectación (Eichlin, 1995). Delgado 2005, caracterizó la morfología del insecto determinando cinco características que la difieren con *C. theobromae,* identificando así a Carmenta Negra para Colombia, precisamente en el Norte de Santander cómo *Carmenta forasemis* (Busck) Eichlin., otra diferencia es que los daños causados por *C. foraseminis* (Busck) Eichlin, son más severos e importantes en comparación con *C. theobromae.* (Morán, J., y Castillo, P., 2020; Alomía et al., 2021).

La aparición del insecto ha sido creciente desde la fecha de reporte en Colombia (ICA I. C., 2013), sin embargo, tras un monitoreo puntual en seis sitios en el norte del Departamento del Huila no se reportó *C. foraseminis* (Busck) Eichlin, aunque hubo novedad de pervivencia en departamentos cercanos como Tolima, Cauca y el Caquetá (Carabalí Muñoz et al., 2018). En el año 2019, la misma institución presentó otro boletín en el que menciona que el insecto tiene una proliferación en los valles interandinos, resaltando que es una serie amenaza en la producción de cacao, mencionando al Departamento del Tolima (ICA I. C., 2019); aunque ya se hacía referencia en periódicos nacionales como un “nuevo villano” para el Departamento del Huila (Palombi, 2018).

En el año 2020, en el Modelo productivo de Cacao para el Departamento del Huila financiado por Minagricultura, en el manejo integrado de plagas y enfermedades (MIPE) se hace alusión al perforador de Mazorca Carmena negra, teniendo un espacio amplio en el que se mencionan a manera de esquema, apartados por las características del insecto, síntomas, signos, ciclo de vida y control, este último haciendo énfasis en los diferentes métodos de prevención y corrección de la mariposa (Ramirez, y otros, 2020); sin embargo, pese a la diversidad de métodos de manejo, todos estos resultan con una eficiencia inferior al 50%.

Relación ecológica

De acuerdo con los valores medios de temperatura, tanto para las temperatura máxima y mínima, el departamento se puede dividir en cuatro regiones así: a) la región norte, corresponde al valle bajo del Magdalena, con temperaturas que oscilan entre los 26 y los 28°C, y que comprende los municipios de Yaguará, Palermo, Neiva, Tello, Aipe, Villavieja, parte de Rivera, Baraya, y Campoalegre; b) región media, con temperaturas entre 23 y 26ºC; c) región media con estribaciones cordilleranas, con temperaturas entre 18 y 22ºC, y d) región alta, con temperaturas menores de 18ºC (IGAC, 1994), citado por (Ramirez, y otros, 2020). Según Fedecacao, el régimen de temperatura más apto para el cultivo de cacao se halla entre 24 y 28ºC, el régimen moderadamente apto está tres grados por encima y debajo de estas, aunque a temperaturas inferiores a 25ºC, no hay formación de flores (Rojas & Sacristán, 2013). Teniendo en cuenta las regiones establecidas y el régimen de temperatura para el óptimo desarrollo del cultivo de cacao, los Municipios aptos son aquellos que se ubican en el norte y centro del Departamento en el Valle del Magdalena.

La mariposa Carmenta Negra en el Departamento de Huila, está teniendo una alta incidencia y grado de infestación en las mazorcas de cacao, principalmente en los

Suelos Ecuatoriales 55 (1 y 2): 117-130. https://doi.org/10.47864/se552025p117130

municipios con las temperaturas aptas y en donde están la mayoría de los cultivos, lo que ha causado que actualmente los cacaocultores estén en riesgo de pérdida de la sustentabilidad y sostenibilidad financiera y productiva, dejando consigo millonarias pérdidas. Alrededor del 50% de la producción de cacao del Municipio de Rivera ha sido afectada por Carmenta Negra y amarilla, al igual que se eleva la cifra a 500 cacaocultores que presentan el mismo problema, pese a que Fedecacao y el ICA han venido realizando estudios y capacitación, no se ha logrado controlar o erradicar la plaga, que según cacaocultores los viene afectado en los últimos cuatro años (Perdomo, 2021). El mismo problema viene dándose a manera de tendencia en los Municipios aledaños cómo lo son Baraya, Neiva y Campoalegre.

Las diferentes soluciones en torno al control y manejo de Carmenta Negra no parecen ser del todo eficientes (Alomía et al., 2021), así como no tener un impacto positivo en la asimilación de los cacaocultores (Jaimes et al., 2022). Según Agronegocios 2017, el Instituto Colombiano Agropecuario (ICA), en busca de mejorar los procesos de manejo fitosanitario de plagas y enfermedades, y así fortalecer los procesos productivos de cacao, llevó a cabo capacitaciones a productores y empresarios en el Departamento del Huila sobre la Carmenta Negra, esto en consecuencia de las pérdidas económicas presentadas en el sur del país (Argüello, 2020). Así mismo, cacaocultores del Municipio de Rivera, se capacitaron en la etología del insecto, y adquirieron las prácticas para su control, entre las que están el retiro de frutos infestados, uso de cal y cubierta plástica en los montones, disposición en bolsas de los frutos perforados y su exposición al sol, actividades acompañadas de labores agronómicas (FEDECACAO, 2019).

El panorama actual resulta preocupante porque los esfuerzos institucionales en enseñar y transmitir el conocimiento a los cacaocultores no parece tener el impacto esperado (Alomía et al., 2021), aunque el problema puede que no resulte de los métodos de enseñanza sino en la adopción de las prácticas, similar a lo encontrado en el sistema de producción de cacao en Ghana por Benedicta et al., 2022. Sin embargo, la proliferación de la mariposa está creciendo por dos razones, la primera que resulta de la combinación de dos acciones, una antrópica: que obedece a su poco control, resultado de las actividades de manejo no adoptadas o poco eficientes que son implementadas por los cacaocultores (Osorio, 2022), y la natural: que es su incidencia, resultado de la reproducción abundante del insecto en un entorno favorable, y la segunda razón es su crecimiento en distribución, que se relaciona con la dispersión en el entorno por parte del insecto (Fachin et al., 2019). El movimiento del insecto depende de las características físicas del hábitat y los aspectos ambientales del paisaje en el cual está inmerso, la dispersión garantiza la supervivencia, así como le permite encontrar pareja para la reproducción, nuevos ambientes y alimento (Barrero, González, & Escobar, 2019).

La proliferación de Carmenta Negra es un acumulado de diferentes variables que dependen de las acciones humanas y de las ambientales (Fachin et al., 2019), es así como el escenario de infestación por las variables ambientales corresponde a una característica espacial, que en el caso del departamento del Huila que su topografía deriva por la cordillera central y oriental, y los puntos más bajos están en el Río Magdalena, el desplazamiento del insecto estaría en las alturas bajas (< 1000 m.s.n.m.) combinadas con las características tendenciales del cambio climático, que son la temperatura y la precipitación. Por esta razón, se puede deducir que estas tres características pueden ser determinantes en la pervivencia del insecto, aunque las dos últimas son más concluyentes (Piundo, 2019). Esto porque los factores independientes - externos

responsables del crecimiento o decrecimiento poblacional corresponden al clima y el tiempo (temperatura, humedad, pluviosidad, luminosidad, etc.), factores abióticos como el control natural, o los ciclos temporales y siniestros como incendios, inundaciones y control químico (Romero, 2004).

La temperatura es un factor ambiental que juega en la mayoría de las dinámicas poblacionales de los insectos, ejerciendo una variable dependiente en el crecimiento poblacional (Navarro, 2020). En la evaluación de pérdidas por Carmenta Negra en el Valle del Cauca, los niveles críticos de temperatura media se estimaron entre 26 y 30ºC, mientras la humedad ambiental no incidió en la acción del perforador (Muñoz, Vásquez, & Muriel, 2017). En otra investigación se halló alta incidencia de hasta el 42,1% con el incremento de la temperatura (26,7ºC) mientras en temperaturas menores (25,2ºC) la incidencia fue del 25%, por otra parte, la humedad relativa en el rango de 82,6 y 75,1%, y las altitudes (496, 556 y 745 msnm) no presentaron diferencia significativa en la incidencia de Carmenta (Fachin, *et al.,* 2019). En relación con lo anterior, en el contexto del cambio climático para el departamento del Huila, el factor ambiental temperatura con su tendencia al aumento, se puede pronosticar como un escenario favorable para Carmenta Negra y su aparición con fuerte incidencia desde el año 2016 (Ronquillo, 2022).

Si bien, la proyección que se tiene para Carmenta Negra en el Departamento resulta preocupante, sumado a las estimaciones sobre el aumento de temperatura para aquellas zonas en donde aún no se encuentra el insecto (Pinedo et al., 2022). Las tendencias de cambio climático en el Departamento estiman reducción en las precipitaciones en las épocas secas del año, lo que aumentaría los escenarios de viabilidad en la proliferación del insecto (Polack et al., 2020), esto porque al ser una especie que requiere de vuelo para desplazarse, las lluvias no serían un factor que podría limitar su vuelo. Es un hecho conocido que en las épocas lluviosas son menos frecuentes e intensos los ataques de ácaros, así mismo en los insectos, ya que tiene un efecto de golpe en forma mecánica, al arrastrarlos al suelo o bien inhibiendo y limitando su vuelo (Coscollá, 1980). Por otro lado, se tiene que, en algunas épocas del año, las precipitaciones están por encima de la media (IDEAM, 2020), acontecimiento que puede ser desfavorable para la mariposa. La menor incidencia de Carmenta Negra en cacao ocurrió en el mes de marzo en época de lluvia (Muñoz, Vásquez, & Muriel, 2017).

Pese a que, en el Departamento del Huila, las tierras óptimas son pocas sumado a la reducción del 2,1% estimada, esta se pronostica contando los suelos y las variables climáticas, pero el porcentaje puede ser mayor al sumar las variables biológicas, como lo son las plagas y enfermedades (Ramírez et al., 2020). Otros efectos que generarán limitaciones en la agricultura por cambio climático, es que las zonas climáticas y agroecológicas se modificarían, obligando a los agricultores a adaptarse, y poniendo en peligro la vegetación y la fauna, lo que empeoraría el actual desequilibrio que hay en la producción de alimentos entre las regiones templadas y frías, las tropicales y subtropicales, como también avanzarían plagas y enfermedades portadas por vectores hacia zonas donde antes no existían (FAO O. d., 1997). Además, la combinación de cambio en temperatura y precipitación en el Huila proyecta una proliferación de plagas y enfermedades de tipo fúngicas como monilia en cacao (Huila, CAM, USAID, FCMSC, & Ecología, 2014).

Estrategias para la mitigación del cambio climático en el cultivo de cacao

Los escenarios por el cambio climático para el sistema productivo de cacao no son tan favorables (Placencia-Vásquez, 2022), por

Suelos Ecuatoriales 55 (1 y 2): 117-130. https://doi.org/10.47864/se552025p117130

esto es importante y necesario empezar a diseñar los sistemas productivos de cacao en el Departamento del Huila desde las dinámicas ambientales, propendiendo por la mitigación y adaptación a tal fenómeno (Ardila, 2023; Vargas, 2015). Para esto, lo primero que se debe proponer es que la planificación del sistema productivo de cacao a establecer parta desde la evaluación de las condiciones edáficas en combinación con las climáticas (Bunn et al., 2019), esta última analizando las repercusiones que tendrá el cambio climático en el futuro inmediato, entendiendo que el cacao es un cultivo perenne, se debe proyectar la adecuación del agrosistema y gestionar las respectivas medidas que le permitan mitigar los efectos negativos sobre el sector (Ramírez, 2021). Y para aquellas zonas en donde el cambio climático está ejerciendo actualmente presiones negativas que se relacionan con la temperatura y la precipitación, es implementar estrategias relacionadas con el microclima ideal en el sistema para mitigar las plagas y las enfermedades (Antolinez et al., 2020; Sandra, 2023).

La planta de cacao se considera una especie umbrófila en edad temprana y heliófila en adulta (Adeniyi, 2019), esto permite diseñar estrategias que podrían ayudar a alcanzar el microclima ideal para controlar el insecto, es así que para la regulación de la temperatura se debe atenuar la radiación, motivo por la cual es importante acompañar el sistema con especies forestales de doseles altos y poco densos en el interior del sistema (Fachin et al., 2019), esto para filtrar la radiación vertical y su absorción por los árboles con menor incidencia al árbol de cacao, esto se debe evaluar de acuerdo a la temperatura mínima soportada por la planta de cacao (Alfonso, 2022). Cada especie tiene una temperatura mínima, máxima y óptima para su normal desarrollo y sobrevivencia; sin embargo, los cultivos despliegan una amplia plasticidad estructural y fisiológica que les permite adaptarse a diferentes temperaturas (Chaves & Gutiérrez, 2017).

Además de la radiación directa, otra variable que juega en el aumento de la temperatura y que llega al sistema, es la temperatura del viento, haciendo que la planta pierda humedad por la evaporación (Albiño, 2019), para esto es importante establecer arboles con función de cortinas rompevientos para que la corriente de aire amortigüe en ellos (Yela et al., 2023). Esto ayudaría porque el proceso de evaporación y evapotranspiración es dependiente de algunos parámetros climatológicos como son la temperatura del aire, velocidad del viento, radiación y humedad atmosférica (FAO, 2006), esto sin desconocer la pendiente del terreno y el tipo de suelo que, aunque no son características climáticas, si tienen implicaciones directas sobre el balance de radiación en el sistema agrícola (Leinen, 2021), así como ser determinantes en la humedad, por esto es importante disponer los árboles acompañados con drenajes que eviten la pérdida del líquido. Porque la cantidad de agua precipitada que se pierde por escurrimiento superficial depende de la intensidad de la lluvia, pendiente del terreno, tipo de suelo y sus condiciones hidráulicas, cobertura vegetal, entre otras (FAO, 2006); estrategia que también ayudaría en épocas de sequía, mayor limitante de siembra en zonas del Huila (García & Moreno, 2016).

Cabe resaltar que las estrategias mencionadas deben ir acompañadas de varias opciones de manejo como son las de tipo cultural y etológico (trampas y atrayentes), remoción y solarización de frutos afectados y uso de enemigos naturales (Carabalí, Senejoa, & Montes, 2018), junto con las opciones de manejo físico, químico, genético y legal (Cubillos, 2013). En caso del uso de los biológicos que funciona como biocontroladores, estas especies de hongos, insectos y bacterias se les deben dar buenas condiciones ambientales para garantizar su efecto (Anzules et al., 2019), por

lo que el asocio con las especies forestales resulta benéfico para su desempeño, vitalidad y viabilidad (Ríos-Moyano et al., 2023). Aunque cada una de las estrategias que se vienen mencionando de igual manera, se les debe integrar un cronograma en el que se planifiquen las actividades, y estas deben ser acordes a la etología de Carmenta Negra (Fachin et al., 2019).

Se ha identificado que la emergencia de los machos y hembras de Carmenta Negra ocurren en un 60 a 63.39% en las horas de la tarde (Sanchez, Navarro, Marín, Casares, & Fuentes, 2011), motivo por el cual se recomienda que la aplicación de los biocontroladores de tipo insecto se realice en ese horario, y los biocontroladores como hongos y bacterias que generalmente tienen un hábito invasivo, se haga en horas de la mañana (Mezones, 2019). Estas actividades deberían realizarse de manera intensiva al menos durante una semana, y así lograr abarcar una gran población del insecto, ya que se determinó que la fase adulta tiene una duración de uno a tres días (Sanchez, Navarro, Marín, Casares, & Fuentes, 2011).

Es de mencionar que para hacer mucho más viable los controles, la hora con mayor actividad de Carmenta Negra es de las doce a las trece horas, con una existente periodicidad en los días (Herrera, y otros, 2012). Por último, es de resaltar que para lograr todo lo anterior, se requiere de un modelo de asistencia técnica que tenga una capacidad de hacer que el cacaocultor logre apropiar los conocimientos (Rosero, 2019). Ya que resulta claro que, a pesar de los avances tecnológicos incorporados al cultivo, si no se implementa una estrategia pedagógica clara y eficaz que facilite dicha apropiación del conocimiento, el mismo permanecerá almacenado en publicaciones y no ejecutándose en campo (Briceño, 2017).

CONCLUSION

La combinación de los factores temperatura y precipitación con sus variaciones climáticas extremas han generado que Carmenta Negra incida con mayor persistencia en los sistemas productivos de cacao en los municipios del norte del Departamento del Huila en Colombia; sumado al deficiente manejo por parte de los cacaocultores, motivo por el cual se requiere una mejor estrategia pedagógica o ayuda en los instrumentos para la implementación de las prácticas de manejo.

El incremento de temperatura atmosférica media en el departamento del Huila está propiciando nuevas zonas para el establecimiento de Carmenta Negra, por lo que su distribución se está propagando hacia regiones vecinas.

El control de Carmenta Negra no ha sido eficiente en el Departamento del Huila, razón por la cual se hace necesario implementar estrategias para la mitigación y adaptación al cambio climático asociadas al manejo del cultivo de cacao, y así aumentar la probabilidad de control de esta plaga.

BIBLIOGRAFÍA

Adeniyi, D. (2019). Diversidad de patógenos del cacao e impacto en el rendimiento y la producción global. IntechAbierto. Doi: 10.5772/intechopen.81993

Agronegocios. (12 de Abril de 2017). *Los cacaocultores se están capacitando contra plagas*. (A. Cardona, Editor) Obtenido de agronegocios.co: https://www.agronegocios.co/agricultura/los-cacaoteros-se-estan-capacitando-contra-plagas-2622639

Alarcón, V. F. (2021). *Modelo SIG para la zonificación agroecológica de cultivos: estudio de caso cuenca hidrográfica del río Las Ceibas, Huila, Colombia* [Tesis de grado, Universidad de Manizales]. **https://ridum.umanizales.edu.co/bitstream/handle/20.500.12746/5746/Alarcon_Victor_2019.pdf?sequence=1&isAllowed=y**

Albiño, J. I. (2019). *Influencia del cambio climático en la producción de los cultivos de cacao en el cantón Shushufindi* [Tesis Maestría, Universidad Andina Simón Bolívar, Sede Ecuador]. http://hdl.handle.net/10644/6890

Alfonso, N. F. (2022). *Identificación de insectos polinizadores en el cultivo de cacao, en la plantación Luker Agrícola ubicada en Villanueva Casanare* [Tesis de grado, Universidad de los Llanos]. https://repositorio.unillanos.edu.co/bitstream/handle/001/2845/111003400.pdf?sequence=2&isAllowed=y

Almeida, A., & Valle, R. (2007). Ecophysiology of the cacao tree. *Brazilian Journal of Plant Physiology, 19*(4), 425-448. https://doi.org/10.1590/S1677-04202007000400011

Alomía, J., Alomía, C., & Vega, B. (2021). Carmenta foraseminis Eichlin and Phytophthora palmivora on fruits of Theobroma cacao L. in Satipo, Peru. *Manglar*, *18*(3), 283–288. https://doi.org/10.17268/manglar.2021.037

Antolínez, E. Y., Almanza, P. J., Barona, A. F., Polanco, E., & Serrano, P. A. (2020). Estado actual de la cacaocultura: una revisión de sus principales limitantes. *Ciencia y Agricultura*, *17*(2), 1–11. https://doi.org/10.19053/01228420.v17.n2.2020.10729

Anzules, V., Borjas, R., Alvarado, L., Castro-Cepero, V., & Julca-Otiniano, A. (2019). Cultural, biological and chemical control of Moniliophthora roreri and Phytophthora spp IN Theobroma cacao 'CCN-51.' *Scientia Agropecuaria*, *10*(4), 511–520. https://doi.org/10.17268/sci.agropecu.2019.04.08

Ardila, N. (2023, February 27). *El Pasador de la Mazorca de cacao o Carmenta Negra*. Mundo Cacao. https://www.mundocacao.com.co/noticias/c/0/i/71083324/el-pasador-de-la-mazorca-del-cacao-o-carmenta-negra

Argüello, B. K. (2020). Caracterización morfológica de oomicetes asociados a cultivos de theobroma cacao L. en el departamento del Huila, Colombia. *Universidad de Los Andes*, 1–13. http://hdl.handle.net/1992/44751

Barrero, W. J., González, G. L., & Escobar, F. (2 de diciembre de 2019). *¿A dónde y cómo se mueven los insectos?* Recuperado el 14 de enero de 2021, de Instituto de ecología INECOL: https://www.inecol.mx/inecol/index.php/es/ct-menu-item-25/ct-menu-item-27/17-ciencia-hoy/953-a-donde-y-como-se-mueven-los-insectos

Barros, N. O. (1972). Enfermedades del Cacao y su control. *Instituto Colombiano Agropecuario*, 6. Obtenido de http://hdl.handle.net/20.500.12324/23640

Benedicta Y. Fosu-Mensa, Elvis D. Okoffo, Michael Mensah, 2022. Assessment of farmer´s knowledges and pesticides management in cocoa production in Ghana. International Journal of Advanced and Applied Sciences. 9 (3). Pages 100110.

Brand, T. O. (2014). (U. N. distancia, Ed.) Estudio agronómico de las enfermedades escoba de bruja (Crinipellis perniciosa) y Moniliasis (Moniliophthora roreri) en el cultivo de cacao *(Theobroma cacao)* en el Departamento del Huila, 68. Recuperado el 15 de 01 de 2021, de https://repository.unad.edu.co/bitstream/handle/10596/2462/83253876.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Briceño, P. D. (Junio de 2017). Proyección de la producción de cacao (Theobroma cacao l.) en el Departamento del Huila en Colombia. Limitantes y oportunidades para el sector cacaotero. *Revista de Investigaciones Agroempresariales, 3*, 50-56. https://doi.org/10.23850/25004468.1434

Bunn, C., Lundy, M., Wiegel, J., & Castro-Llanos, F. (2019). Impacto del cambio climático en la producción de cacao para Centroamérica y El Caribe. *Centro Internacional de Agricultura Tropical [CIAT]*, 1–34.

Carabalí Muñoz, A., Senejoa Lizcano, C. E., & Montes Prado, M. (2018). *Reconocimiento, daño y opciones de manejo de Carmenta foraseminis Eichlin (Lepidóptera: Sesiidae), perforador del fruto y semilla de cacao Theobroma cacao L. (Malvaceae)*. Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (Agrosavia). https://doi.org/10.21930/agrosavia.manual.7402599

Cenigaa, C. d., Corhuila, C. U., & Huila, G. d. (2018). Cambio climático y variabilidad climática extrema, vulnerabilidad y adaptación del sector agropecuario en el Departamento del Huila. 24.

Cerón, A. (2023). *Evaluación de la sostenibilidad de dos sistemas de producción de cacao (Theobroma cacao L.). en el municipio de Algeciras, Huila* [Tesis de grado, Universidad Nacional Abierta y a Distancia UNAD]. https://repository.unad.edu.co/handle/10596/57625

Cobaleda, L. G. (2022). *Análisis Económico de las Exportaciones de Cacao en Colombia durante el periodo 2010-2020* [Tesis de grado]. Universidad Antonio Nariño.

Correa Ramos, D. (2023). *Dinámicas socio-territoriales y temperatura superficial terrestre en el área urbana de Lorica y su zona de influencia durante el período 2013 – 2022* [Tesis de grado, Universidad de Córdoba]. https://repositorio.unicordoba.edu.co/server/api/core/bitstreams/1fc4a543-d6cb-4557-8f1d-5114680bdff9/content

Coscollá, R. (1980). Incidencia de los factores climatológicos en la evolución de las plagas y enfermedades de las plantas. *Boletín servicio de Defensa contra Plagas e inspección fitopatológica , 6*(2), 123-139. Recuperado el 16 de diciembre de 2020, de https://www.divulgameteo.es/fotos/meteoroteca/Influencia-clima-plagas.pdf

Cubillos, G. (2013). *Manual del perforador de la mazorca del cacao carmenta foraseminis (Busck) Eichlin.* Medellín, Colombia: Compañia Nacional de Chocolates S.A.S. Recuperado el 11 de Febrero de 2021, de https://repository.agrosavia.co/bitstream/handle/20.500.12324/13314/80893_67113.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Cuellar, J. T. (2021). *Efecto de los híbridos "rojo" y "amarillo" y clones TSH-565 y ICS-95 de cacao (Theobroma cacao) en el ataque de plagas y enfermedades en fincas cacaoteras de los municipios de Tarqui y suaza, departamento del Huila* [Tesis de grado, Universidad Nacional Abierta y a Distancia UNAD]. https://repository.unad.edu.co/handle/10596/40774

Chaves, B. N., & Gutiérrez, S. M. (2017). Respuesta al estrés por calor en los cultivos. II. Tolerancia y tratamiento agronómico. *Agronomía Mesoamericana, 28*(1), 18. doi:10.15517/am.v28il.21904

Delgado, N. (Agosto de 2005). Caracterización morfológica de los Sesiidae (Insecta: Lepidoptera) perforadores del fruto del cacao (Theobroma cacao L.) presentes en la región costera del estado de Aragua, Venezuela. *Revista entomotropica (Sociedad Venezolana de Entomología), 20*(2), 97-112. Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/28250227

Eichlin, T. (1995). A new Panamanian clearwing moth (Sesiidae: Sesiinae). *Journal of the Lepidopterists' Society, 49*(1), 39-42.

Fachin, G., Pinedo, K., Vásquez, J., Flores, E., Doria, M., Alvarado, J., Koch, C., & Bellido, J. J. (2019). Factores ambientales y su relación con la incidencia de Carmenta foraseminis (Busck) eichlin (Lepidóptera: Sesiidae) en frutos de theobroma cacao "cacao" en San Martín, Perú. *Boletín Científico Centro de Museos Museo de Historia Natural*, *23*(2), 133–145. https://doi.org/10.17151/bccm.2019.23.2.6

FAO (2006). *Evapotranspiración del cultivo: guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos* (Vol. 298). Recuperado el 16 de Diciembre de 2020, de http://www.fao.org/3/x0490s/x0490s.pdf

FAO (02 de Diciembre de 1997). *La Agricultura y los cambios climáticos: la función de la FAO*. Recuperado el 12 de Diciembre de 2020, de FAO Noticias: http://www.fao.org/noticias/1997/971201-s.htm

FEDECACAO, F. N. (27 de Mayo de 2019). *FEDECACAO capacita a productores sobre perforadores del cacao en el Huila*. (A. Ortiz, Productor) Recuperado el 14 de Diciembre de 2020, de Federación Nacional de Cacaocultores: http://www.fedecacao.com.co/portal/index.php/es/2015-04-23-20-00-33/920-fedecacao-capacita-a-productores-sobre-perforadores-del-cacao-en-el-huila

García, J., Romero, M., & Ortiz, L. (Febrero de 2005). Evaluación edafoclimática de las tierras del trópico bajo colombiano para el cultivo de cacao. *Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (Corpoica)*, 75. Recuperado el 12 de 01 de 2021, de https://repository.agrosavia.co/handle/20.500.12324/2189

García, L. J., & Moreno, F. L. (2016). Respuestas fisiológicas de theobroma cacao L. en etapa de vivero a la disponibilidad de agua en el suelo. *Acta Agronómica, 65*(1), 44-50. http://dx.doi.org/10.15446/acag.v65n1.48161

Graterón, A. F. (2020). *Caracterización fisicoquímica y mineralógica de un suelo de uso agrícola ubicado en el campus El Limonal de la Universidad Santo Tomás, Piedecuesta* [Tesis de grado]. Universidad Santo Tomas.

Herrera, M. B., F. M., Sainz, B. C., Liendo, B. C., Flores, G., & Hernández, J. (2012). Comportamiento de los perforadores del fruto de cacao, Carmenta theobromae (Busk) y Carmenta foraseminis Eichlin (Lepidoptera: Sesiidae). *Entomología Méxicana, 11*(1), 386-390. Recuperado el 14 de diciembre de 2021, de http://www.entomologia.socmexent.org/revista/2012/EC/386-390.pdf

Huila, G. d., CAM, USAID, FCMSC, & Ecología, e. y. (2014). *Plan de cambio climático Huila 2050 preparandose para el cambio climático.* Neiva. Recuperado el 23 de 11 de 2020, de https://www.minambiente.gov.co/images/cambioclimatico/pdf/aproximacion__al_territorio/PICC_HUILA-ilovepdf-compressed.pdf

ICA, I. C. (2013). *Resultados vigilancia del barrenador de la mazorca del cacao Carmenta foraseminis Eichlin en Colombia.* Instituto Colombiano Agropecuario. Boletin 1. Recuperado el 27 de 12 de 2020, de https://www.ica.gov.co/areas/agricola/servicios/epidemiologia-agricola/boletines/nacionales/2013/vigilancia-barrenador-de-la-mazorca-del-cacao-(1).aspx

ICA, I. C. (2019). *Alerta temprana fitosanitaria aplique medidas prontas contra el barrenador de mazorca del cacao.* Boletín No. 11. Recuperado el 15 de 02 de 21, de https://www.ica.gov.co/getattachment/ICAComunica/alertasfito/alerta-fitosanitaria-11.pdf.aspx?lang=es-CO

IDEAM, I. d.-I., & UNAL, U. N. (2018). *La Variabilidad Climática y el Cambio Climático en Colombia.* Universidad Nacional de Colombia, Cundinamarca, Bogota D.C. (Colombia). Recuperado el 15 de enero de 2021, de http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/023778/variabilidad.pdf

Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales [IDEAM]. (2020). *Precipitación*. http://bart.ideam.gov.co/portal/prono_fin_semana/meteorologia/info/Textos/Departamentos/memoHUILA.pdf

Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales [IDEAM]. (2014). *PROYECTO HUILA 2050: PREPARANDOSE PARA EL CAMBIO CLIMÁTICO*. Cambio Climático. http://www.cambioclimatico.gov.co/proyecto-huila

Jaimes Suárez, Y. Y., Agudelo Castañeda, G. A., Báez Daza, E. Y., Montealegre Bustos, F., Coronado Silva, R. A., Rengifo Estrada, G. A., & Rojas Molina, J. (2022). *Modelo productivo para el cultivo de cacao (Theobroma cacao L.) en el departamento de Boyacá*. Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (Agrosavia). https://doi.org/10.21930/agrosavia.model.7405590

Leinen, M. (2021). Análisis jerárquico aplicado a la determinación de la fragilidad ambiental de la subcuenca del Río Carrizal [Tesis de pregrado, Universidad Estatal del sur de Manabí]. https://repositorio.unesum.edu.ec/bitstream/53000/2774/1/ART.CIENTF._%20MOREIRA%20FRANCO%20LENIN.pdf

MADR (27 de abril de 2021). Minagricultura anunció que con el Plan Nacional de Renovación de Cacao se van a invertir $20.500 millones. Obtenido de https://www.minagricultura.gov.co/noticias/Paginas/Minagriculturaanunci%C3%B3-que-con-el-Plan-Nacional-de-Renovaci%C3%B3n-de-Cacao-sevan-a-invertir-$20-500-millones---.aspx/

Mezones I. 2019. Evaluación de Carmenta foraseminis (Busck) Eichlin, y algunas enfermedades de frutos de cacao (Theobroma cacao l.) en tres localidades de Leoncio Prado, Huánuco. Recuperado de: https://agronomia.unas.edu.pe/sites/default/files/TS_IMA_219.pdf

Morán, J., y Castillo, P. (2020). El barrenador del fruto y tallo del cacao (Carmenta theobromae, Lepidoptera: Sesiidae) en el valle de Zarumilla, Tumbes, Perú. *Revista Colombiana de Entomología, 46*(1), 8. https://doi.org/10.25100/socolen.v46i1.10165

Muñoz, G. J., Vásquez, C. Y., & Muriel, R. S. (2017). Estimación de pérdidas generados por Carmenta foraseminis (Busck) Eichlin (Lepidoptera: Sesiidae)Ç en el grano comercial de cacao (Theobroma cacao L.) y registro de controladores biológicos en la granja “Rafael Rivera”, San Jerónimo (Antioquia - Colombia). *Boletín del Museo de Entomología de la Universidad del Valle, 17*(2), 29-36. Recuperado el 14 de diciembre de 2020, de https://bibliotecadigital.univalle.edu.co/bitstream/handle/10893/11655/Estimacion%20de%20perdidas%20generados.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Navarro, L. (2020). Respuestas moleculares de insectos a factores de estrés ambientales y biológicos. In *El Control Natural de Insectos en el Ecosistema Cafetero Colombiano* (pp. 142–157). Cenicafé. https://doi.org/10.38141/10791/0001_6

Nze Asue, M. A. J., Abad González, J. I., Álvarez Folgueras, C., & Operativa, E. e I. (2023). Las políticas climáticas de la UE. La evolución del régimen de comercio de derecho de emisión [Tesis de grado, Universidad de León]. In *The EU climate policies. The evolution of the emissions trading scheme*. https://hdl.handle.net/10612/17228

Ortiz-Torres, M. J. (2022). Alcance de la política de educación ambiental colombiana frente a la Agenda 2030. *Educación y Educadores*, *24*(3). https://doi.org/10.5294/edu.2021.24.3.4

Osorio, E. L. (2022). *Caracterización de los productores de Cacao del Municipio de Marquetalia, Caldas* [Tesis de grado]. Universidad de Caldas.

Osorio Zambrano, M. A. (2021). *Análisis fisiológico y transcriptómico de la respuesta a déficit hídrico en cacao (Theobroma cacao L.) para la identificación de genes candidatos de tolerancia a estrés*.

Palombi, S. (29 de abril de 2018). La carmenta negra degrada el Cacao. *La Patria*, pág. 5. Recuperado el 14 de enero de 2021, de https://www.lapatria.com/tenga-en-cuenta/la-carmenta-negra-degrada-el-cacao-415217

Peraza, Y. (2022). *La producción de cacao en el departamento del Huila: Estrategias para promover su competitividad* [Tesis de grado, Fundación Universidad de América]. http://52.0.229.99/bitstream/20.500.11839/9014/1/2182225-2022-2-EC.pdf

Perdomo, R. D. (05 de marzo de 2021). Plaga Carmenta Negra y Amarilla afecta la producción de cacao en Rivera. *Diario del Huila*, pág. 2. Recuperado el 05 de Marzo de 2021, de https://neivaestereo.com/2021/03/05/plaga-carmenta-negra-y-amarilla-afecta-la-produccion-de-cacao-en-rivera/

Pinedo, J. J., Urango, C., Herrera, G., Botero, L., & Aparicio, A. (2022). Caracterización fisicoquímica de las precipitaciones en el área de influencia del parque arqueológico de San Agustín, departamento de Huila, Colombia. *Ingeniería y Región*, *27*, 12–23. https://doi.org/10.25054/22161325.3034

Piundo Aguilar, D. (2019). *Infestación del "mazorquero del cacao" (Carmenta foraseminis (Busck) Eichlin) y registro de sus enemigos naturales en época de alta precipitación, en los caseríos de Camote y Pozo Rico, Monzón–Huánuco* [Tesis de grado, Universidad Nacional Agraria de la Selva]. http://repositorio.unas.edu.pe/bitstream/handle/20.500.14292/1668/TS_DPA_2019.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Polack, L. A., Lecuona, R. E., & López, S. N. (2020). Control biológico de plagas en horticultura. *Experiencias Argentinas de Las Últimas Tres Décadas. Ediciones INTA. Ciudad de Buenos Aires, Buenos Aires, Argentina*, 444–483.

Ramírez Chamorro, L. E., Abaunza González, C. A., Rodríguez Polanco, L., Varón Devia, E. H., & Barragán Quijano, E. (2020). *Modelo productivo para el cultivo de cacao (Theobroma cacao) para el departamento del Huila*. Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (Agrosavia). https://doi.org/10.21930/agrosavia.model.7403558

Ríos-Moyano, D. K., Rodríguez-Cruz, F. A., Salazar-Peña, J. A., & Ramírez-Godoy, A. (2023). Factores asociados a la polinización del cultivo de cacao (Theobroma cacao L.). *Agronomía Mesoamericana*, *34*(3).

Rojas Briceño, N. B., Oliva-Cruz, M., & Rascón, J. (2021). Idoneidad del territorio para el cultivo sostenible de cacao (Theobroma cacao L.) según presencia de cadmio en suelos de Amazonas. *Revista de Investigación de Agroproducción Sustentable*, *5*(3). https://doi.org/10.25127/aps.20213.821

Rojas, F., & Sacristán, S. J. (2013). *Guía Ambiental para el cultivo de cacao.* Colombia: Ministerio de Agricultura. Recuperado el 14 de diciembre de 2020, de https://www.fedecacao.com.co/site/images/recourses/pub_doctecnicos/fedecacao-pub-doc_05B.pdf

Romero, R. F. (2004). *Manejo integrado de Plagas: las bases los conceptos su mercantilización* (1a ed.). Chapingo, Tezcoco, México: Universidad Autónoma Chapingo. Recuperado el 14 de enero de 2021, de http://agro.unc.edu.ar/~biblio/Manejo%20de%20Plagas.pdf

Ronquillo, A. E. (2022). *Efectos del cambio climático en la incidencia de plagas en los cultivos agrícolas* [Tesis de grado, Universidad Técnica de Babahoyo, Babahoyo.]. http://dspace.utb.edu.ec/bitstream/handle/49000/13125/E-UTB-FACIAG-ING%20AGRON-000417.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Rosero, D. M. (2019). *De la coca al cacao: tecnificación agrícola y transferencia de tecnología en los Andes, Nariño* [Doctoral dissertation, Universidad del Valle]. https://bibliotecadigital.univalle.edu.co/server/api/core/bitstreams/ce71e172-448a-4039-96f1-6420c7a735e5/content

Sandra (2023, May 22). *Cambio climático y su impacto en el cultivo de cacao*. Del Monte AG, Tu Cultivo, Tu Empresa. https://delmonteag.com.ec/cambio-climatico-y-su-impacto-en-el-cultivo-de-cacao/

Sanchez, M., Navarro, R., Marín, C., Casares, R., & Fuentes, V. (2011). Duración de la fase adulta y emergencia de machos y hembras del perforador del fruto de cacao en Choroní y Maracay, estado Aragua. *Agronomía Tropical, 3-4*, 241-251. Recuperado el 14 de diciembre de 2020, de http://ve.scielo.org/pdf/at/v61n3-4/art07.pdf

UN, N. U. (2019). *Cambio Climatico*. Recuperado el 16 de 01 de 2021, de Desafios Globales: https://www.un.org/es/global-issues/climate-change#:~:text=Las%20emisiones%20netas%20mundiales%20de,cero%20neto%22%20aproximadamente%20en%202050.

Varela, S. (2011). La ecofisiología vegetal: una disciplina que nos permite tomar decisiones ante condiciones ambientales desfavorables. *Instituto Nacional de tecnología agropecuario*(56), 4. Recuperado el 14 de diciembre de 2020, de https://inta.gob.ar/sites/default/files/imagenes/presencia56_art_6_0.pdf

Vargas, K. (2015, November 24). *Carmenta negra, plaga presente en los cultivos colombianos*. El Campesino.Com. https://elcampesino.co/carmenta-negra-plaga-presente-en-los-cultivos-colombianos/

Yela, S. del M., Castillo, K. D., Rincón, K. L., & Ordoñez, H. R. (2023). Especies forestales con potencial agroforestal en el Consejo Comunitario Alto Mira y Frontera (Tumaco, Colombia). *Ingeniería y Desarrollo*, *39*(01), 123–137. https://doi.org/10.14482/inde.39.1.634.99

SUELOS ECUATORIALES

Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo

https://doi.org/10.47864/se552025p131140

Remediación química de suelos contaminados en Aguachica, Cesar por el apoderamiento ilícito de hidrocarburos

Chemical remediation of contaminated soils in Aguachica, Cesar due to the illicit appropriation of hydrocarbons

Rosalina González Forero[1*], Sergio Vélez Rey[1]
Alejandro Islas García[2], Jhoan Torres Vergara[3], Alejandro Melo Molina[3]

[1*] Universidad de La Salle, Bogotá, Colombia.
[2] Universidad La Salle México, Ciudad de México, México.
[3] Policía Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia.

Vol. 55 (1 y 2) de 2025 | pp: 131-140 | ISSN 0562-5351 E-ISSN 2665-6558 | REC.: 23/08/2026 - ACEP.: 10/09/2026

RESUMEN

En Colombia, el delito de apoderamiento ilícito de hidrocarburos dejó para el año 2024, 173 hurtos en el departamento del Cesar, principalmente en el municipio de Aguachica. Donde los daños han sido incalculables en los ecosistemas, ya que durante el hurto se instalan válvulas en el oleoducto o poliducto afectado, generando derrames en las zonas aledañas al mismo, debido a la naturaleza tóxica, peligrosa e inflamable de los materiales involucrados, que depositan en suelos y fuentes hídricas cercanas. El protocolo de intervención actual involucra la detección de los tramos de fuga por diferencia de presión en la tubería, dando aviso a la Policía Nacional de Colombia Grupo de Operaciones Especiales Hidrocarburos conocido como GOES-H, el cual identifica el punto exacto, asegura la zona y se comunica con el operador de Ecopetrol, quien envía una cuadrilla, los cuales realizan una excavación en el área para reparar la tubería y vuelven a colocar el suelo removido de forma disturbada y con todo el hidrocarburo mezclado. Desafortunadamente, no hay un protocolo ambiental de recuperación de suelos contaminados y municipios como Aguachica en el departamento del Cesar, están muy afectados en este recurso. Debido a lo anterior, la Universidad de La Salle en alianza con la Dirección de Carabineros/Grupo GOES-H, decidieron caracterizar y analizar soluciones al daño ambiental generado, utilizando técnicas de Remediación Química, para ello, se realizaron muestreos selectivos en puntos de contaminación identificados, análisis fisicoquímico y microbiológico de dichos suelos y también de puntos cercanos de no contaminación; posteriormente, se hizo el diseño, montaje y estudio de la eliminación tóxica, utilizando un degradador molecular comercial de hidrocarburos, el cual, después del tratamiento, mostró una reducción de hidrocarburos del 64%, tras una semana de acción, lo que evidencia una buena y rápida remoción del material peligroso, sin embargo, aspectos como estratificación, textura y la presencia de lixiviados generados, son aspectos ambientales necesarios a considerar, ya que el recurso suelo requiere de una intervención adicional para su remediación completa.

Palabras clave: Aguachica-Cesar, Contaminación Ambiental, Remediación Química.

ABSTRACT

In Colombia, the crime of illegal appropriation of hydrocarbons resulted in 173 thefts in the department of Cesar in 2024, primarily in the municipality of Aguachica. The damage to ecosystems has been incalculable, as valves are installed on the affected oil or multi-product pipeline during the theft, causing spills in the surrounding areas due to the toxic, hazardous, and flammable nature of the materials involved, which are deposited in nearby soils and water sources. The current intervention protocol involves detecting leaks by measuring pressure differences in the pipeline and notifying the Colombian National Police's Special Operations Group for Hydrocarbons (GOES-H). GOES-H identifies the exact location, secures the area, and contacts the Ecopetrol operator, who dispatches a crew. This crew excavates the area to repair the pipeline and replaces the removed soil, which is still contaminated with hydrocarbons. Unfortunately, there is no environmental protocol for the remediation of contaminated soil, and municipalities like Aguachica in the department of Cesar are severely affected in this regard. Therefore, La Salle University, in partnership with the Carabineros Directorate/GOES-H Group, decided to characterize and analyze solutions to the environmental damage generated by using chemical remediation techniques. To this end, selective sampling was carried out at identified contamination points, along with physicochemical and microbiological analyses of the soils and nearby uncontaminated areas. Subsequently, the design, implementation, and study of toxic removal were conducted using a commercial molecular hydrocarbon degrader. After treatment, a 64% reduction in hydrocarbons was observed after one week, demonstrating good and rapid removal of the hazardous material. However, aspects such as stratification, texture, and the presence of generated leachate are necessary environmental considerations, as the soil resource requires further intervention for complete remediation.

Keywords: Aguachica-Cesar, Environmental Pollution, Chemical Remediation.

INTRODUCCIÓN

El apoderamiento ilícito de hidrocarburos en Colombia se tipificó como delito, en el año 2006 (República de Colombia , 2000) y desde ese entonces, 20 años después, es totalmente vigente, ha sido recurrente y las afectaciones al recurso suelo son una gran preocupación. Del total de válvulas encontradas para 2024 el 78% fue en el Departamento del Cesar y de ellas, el 38% en el municipio de Aguachica (Policía Nacional de Colombia, 2024). Estas válvulas ilícitas, según Ecopetrol (2017) son dispositivos rudimentarios y artesanales que los delincuentes usan para robar hidrocarburos y producen derrames que en algunos casos generan piscinas. En la siguiente figura se aprecian los tanques, válvulas y piscinas que son inhabilitadas por la Policía Nacional:



Figura 1. Tanques, válvulas y piscinas que son inhabilitadas por la Policía Nacional. **Fuente**: Policía Nacional de Colombia (2025).

Suelos Ecuatoriales 55 (1 y 2): 131-140. https://doi.org/10.47864/se552025p131140

Como se aprecia en la figura 1, un fenómeno consecuente al apoderamiento ilícito es la contaminación de suelos y ecosistemas circundantes. Ya que según Adeniran et al., 2024, los hidrocarburos son sustancias orgánicas compuestas principalmente por átomos de hidrógeno y carbono, que se encuentran comúnmente en productos derivados del petróleo como la gasolina, el diésel y el ACPM. Los cuáles al ser liberados en el ambiente, a través de diversas actividades humanas tales como la eliminación inadecuada de residuos o los derrames incontrolados, pueden permanecer en el medio ambiente durante períodos prolongados, lo que resulta en impactos perjudiciales en la calidad del aire, el agua y el suelo. En Colombia, la infraestructura de transporte de hidrocarburos ha sido blanco frecuente de actividades ilegales, como perforaciones clandestinas y conexiones ilícitas, que derivan en derrames de crudo y otros combustibles, estas acciones ilícitas amplifican los riesgos ecológicos y sociales al generar suelos degradados, pérdida de productividad agrícola y daños prolongados a los ecosistemas (Policía Nacional, 2020; Cenit, 2020). Asimismo, los riesgos a la salud de las personas que viven en las zonas afectadas, ya que ocasionan afecciones respiratorias crónicas, daños hepáticos y neurológicos (Gutiérrez et al., 2023). Además, que estos en el momento del derrame ocupan los espacios porosos del suelo, afectando su estructura y productividad, con la consecuente pérdida de biodiversidad; y al ser el suelo el soporte del agua, generalmente estos hidrocarburos alcanzan los cuerpos de aguas subterráneos y superficiales cercanos, contaminando reales y potenciales fuentes de agua potable lo que genera efectos perjudiciales para los organismos acuáticos y seres humanos (Omeiza, et al., 2023).

Teniendo en cuenta estos aspectos, la alianza Universidad de La Salle y DICAR/GOES-H, en un esfuerzo importante, por la naturaleza de las condiciones del delito, realizaron un muestreo de suelos recientemente contaminado con hidrocarburos y buscaron remediar este recurso con técnicas de remediación química, ya que son rápidas y eficientes en la eliminación de sustancias tóxicas, donde el propósito de la investigación fue información técnica confiable que sirva como herramienta para la toma de decisiones institucionales y ambientales, fortaleciendo la capacidad del Estado y de la Policía Nacional para enfrentar los efectos del apoderamiento ilícito de hidrocarburos desde una perspectiva científica, preventiva y de restauración ecológica. Además, se busca contribuir al desarrollo de estrategias replicables en otras regiones del país, orientadas a la recuperación de suelos contaminados y a la mitigación de riesgos ambientales asociados a este tipo de delitos.

METODOLOGÍA

A continuación, se presenta la secuencia metodológica realizada en el presente estudio que abarca las fases de muestreo de suelo, análisis de laboratorio, impacto y pruebas de remediación ambiental a nivel laboratorio, para zonas afectadas por el apoderamiento ilícito de hidrocarburos en el Municipio de Aguachica-Cesar.

Muestreo

Con el fin de caracterizar los suelos, se realizó un muestreo selectivo, ya que los puntos eran muy característicos en la contaminación y este tipo de muestreo se utiliza cuando hay diferencias marcadas en color, disrupción en su estructura y otras características especiales (Universidad Europea del Atlántico, 2020). Este punto contaminado se denominó Aguachica 2, de Latitud (Y): 8.506 y Longitud (X): -73.640. Físicamente era un suelo seco, duro, con presencia de actividad ganadera en la zona aledaña. Adicionalmente, se tomó una

muestra de un punto cercano no removido por el operador de Ecopetrol, al que se denominó Aguachica 1(punto blanco), tomado en una zona no contaminada, con el fin de establecer impactos generados al recurso. Se tomaron 2 Kg de cada muestra. En la Figura 2. Se aprecian imágenes del muestreo realizado:



Figura 2. Muestreo de suelos en la zona de estudio. **Fuente**: Autores.

Análisis Fisicoquímico de las Muestras

Con el fin de establecer la composición fisicoquímica de las muestras, se tomó contacto con la Empresa Colombiana de Petróleo (Ecopetrol), y a través del Instituto Colombiano del Petróleo ICP, se llevaron a cabo los análisis para determinar tanto las concentraciones de hidrocarburos como características del suelo, tales como su contenido de nitrógeno, fósforo disponible, capacidad de intercambio catiónico y otras variables clave, para definir el estado de degradación del ecosistema y así identificar el nivel de afectación ambiental. Estos análisis se realizaron en el departamento de Santander por la cercanía a los puntos de muestreo.

Remediación Ambiental

Con el fin de brindar solución a la afectación anteriormente encontrada, en un esfuerzo para la mejora de las comunidades afectadas, la DICAR/GOES-H asumiendo su función de “proteger a todos los ciudadanos Colombianos, en su vida honra y bienes” (Policía Nacional de Colombia, 2012), y la Universidad de La Salle, decidieron utilizar la técnica de Remediación Química, por su capacidad de transformar los contaminantes en sustancias menos tóxicas o más estables, aplicando reactivos químicos. Generalmente estos procesos buscan una oxidación química in situ en el suelo, para degradar rápidamente contaminantes orgánicos como combustibles, disolventes y pesticidas (Martín, 2023). Su eficacia depende de la distribución homogénea del oxidante y de la presencia de sustancias que puedan consumirlo de manera no productiva, como la materia orgánica del suelo (WSP, 2023). Para realizar el procedimiento y brindar una solución acorde con la realidad y el mercado nacional, se contactó una empresa comercial, la cuál asistió la remediación con un agente químico que se denominará DE.

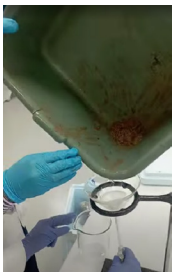
Para el caso particular la proporción utilizada es 50 gr de suelo: 20 mL DE: 100 mL de Agua, aplicando al suelo por aspersión inicialmente el agente químico y luego el agua, posteriormente se homogeniza la muestra, es de anotar que para el caso particular de este suelo se observó sobresaturación y hubo que realizar el drenaje de excesos de agua. Una de las ventajas de este agente químico es que no requiere un tipo de agua especial, puede emplearse agua de la llave, y en aplicaciones a gran escala, es posible utilizar agua de río o de la fuente más cercana disponible. Posterior a la homogenización, el suelo es extendido en una bandeja, ya que la aireación es fundamental en el proceso de oxidación para optimizar su eficiencia. Después de realizar

Suelos Ecuatoriales 55 (1 y 2): 131-140. https://doi.org/10.47864/se552025p131140

estas etapas se esperan 24 horas y se hace un volteo al suelo con el propósito de optimizar la aireación. En la Figura 3, se aprecia la secuencia fotográfica del procedimiento realizado:



Mezcla de reactivos



Remoción de Excesos



Extensión del Suelo



Aireación de Muestra

Figura 3. Proceso de remediación química. **Fuente**: Autores.

Una vez seco el suelo, la muestra fue llevada a un laboratorio certificado en análisis de hidrocarburos en la ciudad de Bogotá, al laboratorio Dr. Calderón, para establecer el contenido final de hidrocarburos. Adicionalmente al agua de exceso se le practicaron los ensayos de pH y Demanda Química de Oxígeno, con el fin de establecer un impacto ambiental al recurso agua y al suelo remediado se le practicaron los ensayos de Materia Orgánica por el método de Walkley Black, Nitrógeno Total por el método de Kjeldahl y Fósforo Disponible por el método de Melich 1, en el Laboratorio de la Universidad de La Salle.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Tabla 1 se aprecian estos resultados obtenidos a las muestras tomadas en los puntos de muestreo tanto para el Punto Blanco (Aguachica 1), como para la muestra contaminada (Aguachica 2). Los análisis realizados evidencian diferencias marcadas entre la muestra contaminada y su blanco. La muestra Aguachica 2, presenta una alta concentración de hidrocarburos que supera 3.5 veces de la original y condiciones fisicoquímicas que muestran una reducción a la mitad en nutrientes importantes del suelo como el nitrógeno y el fósforo disponible (pasando de 1270 mg N/Kg a 600 y de 7,47 mgP/Kg a 4.1), el pH subió de 5.53 a 7.38, lo que tiene lógica, en razón al alto contenido de hidrocarburos y su naturaleza neutra. Además, comparando la concentración de hidrocarburos en suelo que es 2810 mg/Kg con los efectos tóxicos que indica la ATSRD (2016), donde se menciona que a concentraciones 100 ppm hay toxicidad en seres humanos, se evidencia, una situación altamente preocupante, ya que los funcionarios del GOES-H deben llegar al lugar, asegurarlo, esperar varias horas, incluso días a que llegue la cuadrilla, acompañar el procedimiento, estando expuestos todo este tiempo.

Tabla 1. Resultados del análisis fisicoquímico de suelos.

	IDENTIFIC. MUESTRA			Aguachica 1	Aguachica 2 12:10 hs
	Método	**Unidad**	**codigo interno**	**B**	**K**
			Fecha	**----**	**26/07/2024**
ANÁLISIS DE LABORATORIO					
ANÁLISIS FISICOQUÍMICOS					
GYA-HIDROCARBUROS EN SUEL-LOD	EPA 3545 A - EPA 9071 B, Modificado.	% Masa		0,082	0,281
PH O ACIDEZ ACTIVA EN SUELOS R 1:5	ISO 10390	Uni. pH		5,53	7,38
		°C		21,9	21,9
CONDUCTIVIDAD EN SUELOS	NTC 5596 B	mS/cm		58,4	76,6
		°C		24,9	24,7
NITROGENO KJELDAHL EN SUELO	Método Kjeldahl-Modificado. Métodos Analíticos de Laboratorio de Suelo, IGAC, Capítulo III Modificado	mg N/Kg		1270	600
NITROG AMONIACAL INTERCAMBIABLE SUELOS	Destilación: Análisis Químico de Suelos, M. L. Jackson – Volumétrico; SM 4500 NH3 C. Modificado	mg NH4-N/Kg		<12,4	<12,4
NITRATOS EN SUELOS POR DETECCION UV	Lectura método de la Espectrometría molecular, Análisis de Aguas, J. Rodier, 9ªedición, 2011.	mg NO3-N/Kg		<5,00	<5,00
CAPACIDAD INTERCAMBIO CATIONICO	NTC 5268	meq/100 g		10,6	12,7
FOSFORO DISPONIBLE EN SUELOS	NTC 5350, numeral 5.5 y 6.4	mg/Kg		7,47	4.1
TEXTURA EN SUELOS	NTC 6299 B				
ARENA		% Masa		50,5	53
ARCILLA		% Masa		19	24,2
LIMO		% Masa		30,4	22,9
TEXTURA		N/A		Franco	Franco arcilloso arenoso
ANÁLISIS CROMATOGRAFICOS					
AROMATICOS VOLAT. EN AGUAS POR GC/FID-HS (CROMATOGRAFO DE GASES)	EPA 5021 A, EPA 8015 D U.S. EPA SW-846 METHOD 8000D "Determinative Chromatographic Separations". Revision 5, Mar. 2018.				
BENCENO		microg/Kg		<20,0	<20,0
TOLUENO		microg/Kg		<20,0	<20,0
ETILBENCENO		microg/Kg		<20,0	<20,0
m+p-XILENO		microg/Kg		<20,0	<20,0
o-XILENO		microg/Kg		<20,0	<20,0
1,3,5-TRIMETILBENCENO		microg/Kg		<20,0	<20,0
1,2,4-TRIMETILBENCENO		microg/Kg		<20,0	<20,0
NAFTALENO		microg/Kg		<20,0	<20,0

EPA: Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos
ISO: Organización Internacional de Normalización
NTC: Normas Técnicas Complementarias
IGAC: Instituto Geográfico Agustín Codazzi
SM: Standard Methods
NS: No analizado

Fuente: Modificado de Instituto Colombiano del Petróleo ICP (2024).

Impacto Ambiental

Como se pudo evidenciar en los análisis realizados, el contenido de nutrientes se reduce a la mitad, mientras que el contenido de hidrocarburos se aumenta en 3.5 veces, esto afecta la fertilidad del recurso (Adams, R. Zavala-Cruz, J y Morales-García F., 2008), lo anterior, porque la mayoría de las interacciones biota-suelo son basadas en las cargas iónicas del mismo y cuando los hidrocarburos que son sin carga, ocupan los espacios porosos impiden dicha interacción (Roy y McGill, 1998). Como consecuencia de la reducción de nutrientes, se afecta seriamente la biota, ya que la concentración de hidrocarburos de manera antrópica se da por un vertido se incrementa en su concentración de 0,082% al 0,281%, alcanzando niveles que, según

Suelos Ecuatoriales 55 (1 y 2): 131-140. https://doi.org/10.47864/se552025p131140

Adams, R. Zavala-Cruz, J y Morales-García F. (2008) causan afectación importante.

Posterior a la remediación descrita en la metodología, el suelo fue analizado en el Laboratorio Dr. Calderón para establecer el contenido de Hidrocarburos Totales. A continuación, se aprecian los resultados tras dos días de tratamiento en la Tabla 2:

Tabla 2. Resultados del análisis de hidrocarburos en la muestra de suelo remediado.

Parámetro	Reporte	Unidades	Método analítico
Hidrocarburos totales	1021,42	mg/kg	EPA 9071 B, SM 5520 F Modificado

Fuente: análisis del Dr. Calderón LABS (2025)

Como se observa la concentración disminuyó de 2820 mg/Kg a 1021,42 mg/Kg, lo que indica una remoción de 63,65% en la eficiencia, que para dos días de acción resulta muy conveniente y con muy buenos valores, comparada con otros métodos como la Biorremediación, que tarda meses en generar resultados similares. Lo anterior, es aún mejor de lo reportado por Lee & Lee (2012), Lominchar et al. (2017) y Uloaku et al. (2022), quienes indican eficiencias para remediación química entre el 18 y 53%, aunque es de anotar que sus tiempos de reacción fueron después de 5 horas.

Es importante mencionar que el valor de 1021,42 mg/kg todavía es un resultado que puede superar umbrales aceptables para usos agrícolas o residenciales según diferentes guías/normas, como la mexicana (NOM-138-SEMARNAT/SSA1-2012), donde se encuentran límites de referencia para suelos agrícolas en torno a 1000 mg/kg o menos, por lo que hay que optimizar el ensayo, a lo realizado con la sugerencia de la empresa.

En cuanto a los análisis de impacto ambiental asociado al recurso hídrico se observó que el pH de la muestra líquida arrojó un pH de 6 y una Demanda Química de Oxígeno (DQO) de 639 mg/L, con un volumen remanente de 20 mL, es decir 17% del volumen total añadido, lo anterior indica que es importante un sistema de captación y tratamiento, ya que este remanente se constituye en vertimiento y de acuerdo a la Resolución 631 de 2015 (Alcaldía de Bogotá, 2015), el máximo valor para verter en términos de DQO está en 200 mg/L. El pH está en el límite aceptable de 6 a 9 unidades. Lo anterior muestra que, aunque por el lado del recurso suelo se obtengan niveles buenos en la remediación, el líquido remanente se convierte en un tema ambiental que habría que manejar, para no infringir la Ley. Otro aspecto sería optimizar la cantidad de agua a agregar, con ensayos piloto, de tal forma que no se generen vertimientos. Lo anterior, para cada suelo remediado.

Los resultados de los valores para Carbono Orgánico, Nitrógeno Total y Fósforo Disponible del suelo tratado, sin tratar y blanco se compararon (tabla 3).

Tabla 3. Resultados del análisis de hidrocarburos en la muestra de suelo remediado.

Parámetro	Punto Blanco (Aguachica 1)	Punto Contaminado (Aguachica 2)	Suelo Remediado
% Carbono Orgánico	0.97	6.35	1,34
Nitrógeno Total mgN/Kg	1270	600	980
P disponible mgP/Kg	6.52	57.26	27.07

Fuente: Universidad de La Salle (2025).

El % de carbono orgánico aumenta dramáticamente con la adición del hidrocarburo y es lógico debido a que el derrame es un material orgánico oxidable, que reduce en la remediación a valores típicos de la zona, en cuanto al nitrógeno total se observa una disminución en el derrame atribuida a dilución del material por el solvente añadido que aumenta al remover el mismo en la remediación y el contenido de fósforo, se asume proveniente del hidrocarburo que al no degradarse completamente, queda como remanente en el suelo.

CONCLUSIÓN

Es evidente la existencia de un impacto ambiental significativo en suelos contaminados con hidrocarburos, donde su valor aumentó en 3.4 veces al valor de referencia, con implicaciones al ecosistema por la pérdida de funciones ecosistémicas como la disponibilidad de nutrientes y aún más pudiendo afectar a la salud de las personas cercanas a los lugares, o quienes investigan dicho delito como los funcionarios del GOES-H, al tener que trabajar en la presencia de estos materiales. También se demostró como la técnica de Remediación Química es efectiva, es muy rápida y solo en dos días reduce en un 65% la concentración del material tóxico, sin embargo, tal como se aplicó generó vertimientos remanentes que deben considerarse y remediarse igualmente. Por otro lado, se observa recuperación de condiciones químicas en comparación al blanco después de la remediación, por lo que la técnica con algunos ajustes podría recomendarse en campo.

Se recomienda para futuras investigaciones, utilizar más concentraciones de agente oxidante y menos volúmenes de agua para optimizar la remediación a valores aceptados por normatividad existente y a la eliminación de vertidos remanentes, así como también monitoreos posteriores al componente biótico para establecer recuperación del ecosistema y trabajos conjuntos entre la academia y la institucionalidad para lograr resultados efectivos en zonas que así lo requieren.

AGRADECIMIENTOS

Los autores del trabajo agradecen especialmente a la Policía Nacional de Colombia, Dirección de Carabineros y Protección Ambiental, Universidad de La Salle, Bogotá, Universidad La Salle, México y a la Empresa Disol-Eco Colombia por su apoyo y soporte en la realización del proyecto.

REFERENCIAS

Adams, R. Zavala-Cruz, J y Morales-García F. (2008). Concentración Residual de Hidrocarburos en Suelo del Trópico. II: Afectación a la Fertilidad y su Recuperación. *INCI*, 1-15.

Adeniran, M., Oladunjoye, K., Doro. O. (2024). Electrical resistivity imaging of crude oil contaminant in coastal soils – A laboratory sandbox study *J. Appl. Geophy*., 230, 10.1016/j.jappgeo.2024.105516

Alcaldía de Bogotá. 2015. Resolución 631 de 2015. Tomado de. https://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=70346

ATSRD. (2016). *Hidrocarburos totales de petróleo [Total Petroleum Hydrocarbons (TPH)]*. Obtenido de https://www.atsdr.cdc.gov/es/phs/es_phs123.html#:~:text=Las%20exposiciones%20a%20cantidades%20ficientemente,exposici%C3%B3n%20cesa%2C%20los%20s%C3%ADntomas%20desaparecen.

Cenit, 2020. Informe de Gestión Sostenible 2020. Recuperado de: https://cenit-transporte.com/wp-content/uploads/2021/03/informe-de-gestion-sostenible-2020-1.pdf

Dr. Calderón Labs. (2025). *Informe de Ensayo de Suelo AS-118101, AS-118102 y AS-118103.* Bogotá.

Dr. Calderón Labs b. (2025). *Informe Ensayo Suelo AS-117564, AS-117565, AS-117566, AS-117567, AS-117564.* Bogotá.

Ecopetrol. (13 de Julio de 2017). *¿Qué son las válvulas ilícitas?* Obtenido de https://www.youtube.com/watch?v=Adt7iJrY3z8&t=5s

Gutiérrez-Hernández, R., Alvarado-Alanís, J., Flores-Flores, E., Ruíz de Chávez, D., Lazalde-Ramos, B. (2023). Efectos en la salud ante exposición a hidrocarburos. Ibn Sina, , Vol. 14, Núm. 2, págs. 1-13

ICP. (2024). Informe de Laboratorio. Policía Nacional Dirección de Carabineros

Lee, H, Lee Y. (2012). Feasibility analysis of the remediation of fuel oil-contaminated soil and groundwater around the railroad station of Y city, Korea with surfactant-aided soil flushing Asia-Pac. J. Chem. Eng., 8 (3) , pp. 461-472

Lominchar, M.A., *et al.* (2017). Remediation of soil contaminated by PAHs and TPH using alkaline activated persulfate enhanced by surfactant addition at flow conditions, J. Chem. Technol. Biotechnol., 93 (5) (2017), pp. 1270-1278

Martín, M. (2023). *Remediación por residuos de la fabricación... suelos contaminados* [Tesis doctoral, Universidad Complutense de Madrid]. DOCTA UCM. https://docta.ucm.es/entities/publication/20b90ca4-41cb-4a8b-b661-55fa84f9b46e

Omeiza, A., Adeniyi, H., Shettima, N. (2023). Investigation of groundwater vulnerability to open dumpsites and its potential risk using electrical resistivity and water analysis Heliyon., 8 Article e09855, 10.1016/j.heliyon.2023.e13265

Policía Nacional (2020). Operativos contra el contrabando de hidrocarburos. Obtenido de Policía Nacional de Colombia: https://www.policia.gov.co/noticia/capturadas-26-personas-que-instalaban-valvulas-ilicitas-al-poliducto-generando-danos-al

Policía Nacional de Colombia. (2012). *Funciones y Deberes*. Obtenido de https://www.policia.gov.co/quienes-somos#:~:text=Prevenir%20situaciones%20y%20comportamientos%20que,posible%2C%20limitarla%20al%20m%C3%ADnimo%20necesario.

Policía Nacional de Colombia. (2024). *Informe de Gestión*. Obtenido de https://www.policia.gov.co/sites/default/files/descargables/INFORME%20ANUAL%20DE%20GESTION%20POLICIA%20NACIONAL%202024.pdf

Policía Nacional de Colombia. (5 de Septiembre de 2025). *Golpe a las economías ilícitas y fortalecimiento a la protección de bosque nativo en zona selvática*. Obtenido de https://www.policia.gov.co/noticia/golpe-las-economias-ilicitas-fortalecimiento-proteccion-bosque-nativo-en-zona-selvatica

República de Colombia . (2000). *Ley 599 DE 2000*. Obtenido de https://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=6388&dt=S

Roy JL, McGill WB (1998). Characterization of disaggregated nonwettable surface soils found at old spill site. *Can. J. Soil Sci. 78*: 331-344

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales & Secretaría de Salud. (2013). *NOM-138-SEMARNAT/SSA1-2012. Límites máximos permisibles de hidrocarburos en suelos y lineamientos para muestreo en sitios contaminados*. Diario Oficial de la Federación. http://www.dof.gob.mx

Uloaku M., Samuel J., Abbey, A., Ifelebuegu, A. (2022). A systematic review on the effectiveness of remediation methods for oil contaminated soils, Environmental Advances, Volume 9, ISSN 2666-7657, https://doi.org/10.1016/j.envadv.2022.100319.

Universidad Europea del Atlántico (2020). Recuperación de Suelos Contaminados. Muestreo de Suelos

Universidad de La Salle. (2025). Resultados ed Laboratorio

WSP. (2023, 20 de abril). *Técnicas de remediación de suelos*. https://www.wsp.com/es-pe/insights/tecnicas-de-remediacion-de-suelos