



Tecnura

Tecnología y cultura, afirmando el conocimiento

Universidad Distrital Francisco José de Caldas
Facultad Tecnológica

Volumen 30 - Numero 89
Julio - Septiembre de 2026

p-ISSN: 0123-921X
e-ISSN: 2248-7638



UNIVERSIDAD DISTRITAL
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

Revista TECNURA
Tecnología y cultura, afirmando el conocimiento
Universidad Distrital Francisco José de Caldas
Facultad Tecnológica

Volumen 30 - Numero 89
Julio - Septiembre de 2026
p-ISSN: 0123-921X - e-ISSN: 2248-7638

EDITORIA

PhD. Lely Adriana Luengas Contreras
Universidad Distrital Francisco José de Caldas,
Colombia.

Fernando Martirena, Ph.D. Ing
Universidad Central de Las Villas, Cuba.

Adriana Martínez Hernández, Ph.D. Ing,
Universidad Iberoamericana, México.

EDITORES ASISTENTES

Carlos David Ballén Ladino

Alma De León Hernández, Ph.D. Ing,
Universidad Nacional Autónoma de México
(UNAM).

COMITÉ EDITORIAL-CIENTÍFICO

Jimmy Barco Burgos,
Ph.D. Ing, Concordia University, Canadá.

Miguel Ángel Padilla Castañeda, Ph.D.,
Universidad Nacional Autónoma de México
(UNAM).

Martín Pedro Gómez, Ph.D.
Comisión Nacional de Energía Atómica,
Argentina.

Joao Vidal de Carvalho, Ph.D.,
Instituto Politécnico do Porto Escola Superior de
Educação, Portugal.

Oreste Piro, Ph.D.
Universidad de les Illes Balears. España.

Jesús Águila León, Ph.D., Universidad de Gua-
dalajara, México

Diego Luis González ,Ph.D. CNR-IMM, Bologna,
Italia.

EVALUADORES

Manuel Karim Sapag, Ph.D. Ing
Universidad Nacional de San Luis, Argentina.

Maria Lígia Chuerubim
Universidade Federal de Uberlândia, Brasil

Rosario Chaza Chimeno
Universidad de Sevilla, España

Antonio-J. Sánchez-Fernández
Universidad de La Laguna, España

Katerine Márceles Villalba
Universidad de Antioquia, Colombia.

Mónica Yolanda Moreno Revelo
Universidad Mariana, Colombia

Pedro Julián Gallego Quintana
Universidad de Tolima, Colombia

Luis Carlos Araujo, Fundación Universitaria del
Área Andina, Colombia

Jorge Arturo Pineda Jaimes
Universidad Nacional de Colombia, Colombia

José Gregorio Solorzano Movilla
Escuela Superior de Administración Pública,
Colombia.

Óscar Jardey Suárez, Universidad de Nariño,
Colombia

Elías Ernesto Rojas Martínez,
Fundación Universitaria del Área Andina,
Colombia.

Frank David Lascarro Navarro, Universidad
Nacional Mayor de San Marcos, Perú.

Jorge Eliécer Galvis Daza, Fundación
Universitaria del Área Andina, Colombia

COORDINACIÓN EDITORIAL

Fernando Piraquive
Oficina de Investigaciones
Universidad Distrital Francisco José de Caldas

DISEÑADOR

David Valero

Tecnura

Julio - Septiembre de 2026

REVISTA TECNURA

La revista Tecnura es una publicacion institucional de la Facultad Tecnologica de la Universidad Distrital Francisco Jose de Caldas de caracter cientifico-tecnologico, arbitrada mediante un proceso de revision entre pares de doble ciego. La periodicidad de la conformacion de sus comites Cientifico y Editorial esta sujeta a la publicacion de articulos en revistas indexadas internacionalmente por parte de sus respectivos miembros.

PERIODICIDAD

Es una publicacion de caracter cientifico-tecnologico con periodicidad trimestral, que se publica los meses de enero, abril, julio y octubre. Su primer numero aparecio en el segundo semestre del ano 1997 y hasta la fecha ha mantenido su regularidad.

COBERTURA TEMATICA

Las areas tematicas de interes de la revista Tecnura estan enfocadas a todos los campos de la ingenieria, como la electronica, telecomunicaciones, electricidad, sistemas, industrial, mecanica, catastral, civil, ambiental, entre otras. Sin embargo, no se restringe unicamente a estas, tambien tienen cabida los temas de educacion y salud, siempre y cuando esten relacionados con la ingenieria. La revista publicara unicamente articulos de investigacion cientifica y tecnologica, de reflexion y de revision.

MISION

La revista Tecnura tiene como mision divulgar resultados de proyectos de investigacion realizados en el area de la ingenieria, a traves de la publicacion de articulos originales e ineditos, realizados por academicos y profesionales pertenecientes a instituciones nacionales o extranjeras del orden publico o privado.

PUBLICO OBJETIVO

La revista Tecnura esta dirigida a docentes, investigadores, estudiantes y profesionales interesados en la actualizacion permanente de sus conocimientos y el seguimiento de los procesos de investigacion cientifico-tecnologica, en el campo de la ingenieria.

INDEXACION

Tecnura es una publicacion de caracter academico indexada en los indices regionales pubindex indexada y clasificada en categoria B, Scielo Colombia

y Redalyc (Mexico); ademas de las siguientes bases bibliograficas: INSPEC del Institution of Engineering and Technology (Inglaterra), Fuente Academica Premier de EBSCO (Estados Unidos), CABI (Inglaterra), IndexCorpernicus (Polonia), Informe Academico de Gale Cengage Learning (Mexico), Periodica de la Universidad Nacional Autonoma de Mexico (Mexico), Oceanet (Espana) y Dialnet de la Universidad de la Rioja (Espana); tambien hace parte de los siguientes directorios: Sistema Regional de Informacion en Linea para Revistas Cientificas de America Latina, el Caribe, Espana y Portugal Latindex (Mexico); Indice Bibliografico Actualidad Iberoamericana (Chile), e-Revistas (Espana), DOAJ (Suecia), Ulrich de Proquest (Estados Unidos).

FORMA DE ADQUISICION

La revista Tecnura se puede adquirir a traves de canje o suscripcion en el portal de la de la revista.

REPRODUCCION

Se autoriza la reproduccion total o parcial de los articulos de esta revista para uso academico o interno de las instituciones citando la fuente y el autor. Las ideas expresadas se publican bajo la exclusiva responsabilidad de los autores y no necesariamente reflejan el pensamiento del Comité Editorial de la revista.

DIRECCION POSTAL

Enviar a Ph.D. Lely Adriana Luengas Contreras
Director y Editor Revista Tecnura
Sala de Revistas, Bloque 5, Oficina 305
Facultad Tecnologica
Universidad Distrital Francisco Jose de Caldas
Direccion: Cl. 68d Bis A Sur # 49 F - 70, Bogota
Telefono: 571-3239300
Bogota, D.C., Colombia
Correo electronico:

tecnura.ud@udistrital.edu.co

Tecnura en internet:

<https://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/Tecnura>



**UNIVERSIDAD DISTRITAL
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS**

Revista TECNURA
Tecnología y cultura, afirmando el conocimiento
Universidad Distrital Francisco José de Caldas
Facultad Tecnológica

Volumen 30 - Numero 89
Julio - Septiembre de 2026
p-ISSN: 0123-921X - e-ISSN: 2248-7638

EDITOR

PhD. Lely Adriana Luengas Contreras
Universidad Distrital Francisco José de Caldas,
Colombia.

Fernando Martirena, Ph.D. Ing
Universidad Central de Las Villas, Cuba.

Adriana Martínez Hernández, Ph.D. Ing,
Universidad Iberoamericana, México.

ASSISTANT EDITOR

Carlos David Ballén Ladino

Alma De León Hernández, Ph.D. Ing,
Universidad Nacional Autónoma de México
(UNAM).

EDITORIAL-SCIENTIFIC COMMITTEE

Jimmy Barco Burgos,
Ph.D. Ing, Concordia University, Canadá.

Miguel Ángel Padilla Castañeda, Ph.D.,
Universidad Nacional Autónoma de México
(UNAM).

Mario Ricardo Arbulu Saavedra,
Ph.D. Ing, Corporación Universitaria del Huila.

Joao Vidal de Carvalho, Ph.D.,
Instituto Politécnico do Porto Escola Superior de
Educação, Portugal.

Martín Pedro Gómez, Ph.D.
Comisión Nacional de Energía Atómica,
Argentina.

Jesús Águila León, Ph.D., Universidad de Gua-
dalajara, México

Oreste Piro, Ph.D.
Universidad de les Illes Balears. España.

Mario Guadalupe González Pérez, Ph.D. Ing,
Universidad de Guadalajara, México.

Diego Luis González ,Ph.D. CNR-IMM, Bologna,
Italia.

EVALUATORS

Manuel Karim Sapag, Ph.D. Ing
Universidad Nacional de San Luis, Argentina.

Maria Lígia Chuerubim
Universidade Federal de Uberlândia, Brasil

Rosario Chaza Chimeno
Universidad de Sevilla, España

Antonio-J. Sánchez-Fernández
Universidad de La Laguna, España

Katerine Márceles Villalba
Universidad de Antioquia, Colombia.

Mónica Yolanda Moreno Revelo
Universidad Mariana, Colombia

Pedro Julián Gallego Quintana
Universidad de Tolima, Colombia

Luis Carlos Araujo, Fundación Universitaria del
Área Andina, Colombia

Jorge Arturo Pineda Jaimes
Universidad Nacional de Colombia, Colombia

José Gregorio Solorzano Movilla
Escuela Superior de Administración Pública,
Colombia.

Óscar Jardey Suárez, Universidad de Nariño,
Colombia

Elías Ernesto Rojas Martínez,
Fundación Universitaria del Área Andina,
Colombia.

Frank David Lascarro Navarro, Universidad
Nacional Mayor de San Marcos, Perú.

Jorge Eliécer Galvis Daza, Fundación Universita-
ria del Área Andina, Colombia

EDITORIAL COORDINATION

Fernando Piraquive
Oficina de Investigaciones
Universidad Distrital Francisco José de Caldas

DESIGN

David Valero

Tecnura

July - September of 2026

TECNURA JOURNAL

La revista Tecnura es una publicacion institucional de la Facultad Tecnologica de la Universidad Distrital Francisco Jose de Caldas de caracter cientifico-tecnologico, arbitrada mediante un proceso de revision entre pares de doble ciego. La periodicidad de la conformacion de sus comites Cientifico y Editorial esta sujeta a la publicacion de articulos en revistas indexadas internacionalmente por parte de sus respectivos miembros.

PERIODICITY

Es una publicacion de caracter cientifico-tecnologico con periodicidad trimestral, que se publica los meses de enero, abril, julio y octubre. Su primer numero aparecio en el segundo semestre del ano 1997 y hasta la fecha ha mantenido su regularidad.

THEMATIC COVERAGE

Las areas tematicas de interes de la revista Tecnura estan enfocadas a todos los campos de la ingenieria, como la electronica, telecomunicaciones, electricidad, sistemas, industrial, mecanica, catastral, civil, ambiental, entre otras. Sin embargo, no se restringe unicamente a estas, tambien tienen cabida los temas de educacion y salud, siempre y cuando esten relacionados con la ingenieria. La revista publicara unicamente articulos de investigacion cientifica y tecnologica, de reflexion y de revision.

MISSION

La revista Tecnura tiene como mision divulgar resultados de proyectos de investigacion realizados en el area de la ingenieria, a traves de la publicacion de articulos originales e ineditos, realizados por academicos y profesionales pertenecientes a instituciones nacionales o extranjeras del orden publico o privado.

TARGET AUDIENCE

La revista Tecnura esta dirigida a docentes, investigadores, estudiantes y profesionales interesados en la actualizacion permanente de sus conocimientos y el seguimiento de los procesos de investigacion cientifico-tecnologica, en el campo de la ingenieria.

INDEXING

Tecnura es una publicacion de caracter academico indexada en los indices regionales pubindex indexada y clasificada en categoria B, Scielo Colombia

y Redalyc (Mexico); ademas de las siguientes bases bibliograficas: INSPEC del Institution of Engineering and Technology (Inglaterra), Fuente Academica Premier de EBSCO (Estados Unidos), CABI (Inglaterra), IndexCorpernicus (Polonia), Informe Academico de Gale Cengage Learning (Mexico), Periodica de la Universidad Nacional Autonoma de Mexico (Mexico), Oceanet (Espana) y Dialnet de la Universidad de la Rioja (Espana); tambien hace parte de los siguientes directorios: Sistema Regional de Informacion en Linea para Revistas Cientificas de America Latina, el Caribe, Espana y Portugal Latindex (Mexico); Indice Bibliografico Actualidad Iberoamericana (Chile), e-Revistas (Espana), DOAJ (Suecia), Ulrich de Proquest (Estados Unidos).

FORM OF ACQUISITION

La revista Tecnura se puede adquirir a traves de canje o suscripcion en el portal de la de la revista.

REPRODUCTION

Se autoriza la reproduccion total o parcial de los articulos de esta revista para uso academico o interno de las instituciones citando la fuente y el autor. Las ideas expresadas se publican bajo la exclusiva responsabilidad de los autores y no necesariamente reflejan el pensamiento del Comité Editorial de la revista.

POSTAL ADDRESS

Enviar a Ph.D. Lely Adriana Luengas Contreras
Director y Editor Revista Tecnura
Sala de Revistas, Bloque 5, Oficina 305
Facultad Tecnologica
Universidad Distrital Francisco Jose de Caldas
Direccion: Cl. 68d Bis A Sur # 49 F - 70, Bogota
Telefono: 571-3239300
Bogota, D.C., Colombia
Correo electronico:

tecnura.ud@udistrital.edu.co

Tecnura en internet:

<https://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/Tecnura>

El comité editorial de la revista **Tecnura** está comprometido con altos estándares de ética y buenas prácticas en la difusión y transferencia del conocimiento, para garantizar el rigor y la calidad científica. Es por ello que ha adoptado como referencia el Código de Conducta que, para editores de revistas científicas, ha establecido el Comité de Ética de Publicaciones (COPE: Committee on Publication Ethics) dentro de los cuales se destaca:

Obligaciones y responsabilidades generales del equipo editorial

En su calidad de máximos responsables de la revista, el comité y el equipo editorial de **Tecnura** se comprometen a:

- Aunar esfuerzos para satisfacer las necesidades de los lectores y autores.
- Propender por el mejoramiento continuo de la revista.
- Asegurar la calidad del material que se publica.
- Velar por la libertad de expresión.
- Mantener la integridad académica de su contenido.
- Impedir que intereses comerciales comprometan los criterios intelectuales.
- Publicar correcciones, aclaraciones, retractaciones y disculpas cuando sea necesario.

Relaciones con los lectores

Los lectores estarán informados acerca de quién ha financiado la investigación y sobre su papel en la investigación.

Relaciones con los autores

Tecnura se compromete a asegurar la calidad del material que publica, informando sobre los objetivos y normas de la revista. Las decisiones de los editores para aceptar o rechazar un documento para su publicación se basan únicamente en la relevancia del trabajo, su originalidad y la pertinencia del estudio con relación a la línea editorial de la revista. La revista incluye una descripción de los procesos seguidos en la evaluación por pares de cada trabajo recibido. Cuenta con una guía de autores en la que se presenta esta información. Dicha guía se actualiza regularmente y contiene un vínculo a la presente declaración ética. Se reconoce el derecho de los autores a apelar las decisiones editoriales. Los editores no modificarán su decisión en la aceptación de envíos, a menos que se detecten irregularidades o situaciones extraordinarias. Cualquier cambio en los miembros del equipo editorial no afectará las decisiones ya tomadas, salvo casos excepcionales en los que confluían graves circunstancias.

Relaciones con los evaluadores

Tecnura pone a disposición de los evaluadores una guía acerca de lo que se espera de ellos. La identidad de los evaluadores se encuentra en todo momento protegida, garantizando su anonimato.

Proceso de evaluación por pares

Tecnura garantiza que el material remitido para su publicación será considerado como materia reservada y confidencial mientras que se evalúa (doble ciego).

Reclamaciones

Tecnura se compromete responder con rapidez a las quejas recibidas y a velar para que los demandantes insatisfechos puedan tramitar todas sus quejas. En cualquier caso, si los interesados no consiguen satisfacer sus reclamaciones, se considera que están en su derecho de elevar sus protestas a otras instancias.

Fomento de la integridad académica

Tecnura asegura que el material que publica se ajusta a las normas éticas internacionalmente aceptadas.

Protección de datos individuales

Tecnura garantiza la confidencialidad de la información individual (por ejemplo, de los profesores y/o alumnos participantes como colaboradores o sujetos de estudio en las investigaciones presentadas).

Seguimiento de malas prácticas

Tecnura asume su obligación para actuar en consecuencia en caso de sospecha de malas prácticas o conductas inadecuadas. Esta obligación se extiende tanto a los documentos publicados como a los no publicados. Los editores no sólo rechazarán los manuscritos que planteen dudas sobre una posible mala conducta, sino que se consideran éticamente obligados a denunciar los supuestos casos de mala conducta. Desde la revista se realizarán todos los esfuerzos razonables para asegurar que los trabajos sometidos a evaluación sean rigurosos y éticamente adecuados.

Integridad y rigor académico

Cada vez que se tenga constancia de que algún trabajo publicado contiene inexactitudes importantes, declaraciones engañosas o distorsionadas, debe ser corregido de forma inmediata.

En caso de detectarse algún trabajo cuyo contenido sea fraudulento, será retirado tan pronto como se conozca, informando inmediatamente tanto a los lectores como a los sistemas de indexación.

Se consideran prácticas inadmisibles, y como tal se denunciarán las siguientes: el envío simultáneo de un mismo trabajo a varias revistas, la publicación duplicada o con cambios irrelevantes o parafraseo del mismo trabajo, o la fragmentación artificial de un trabajo en varios artículos.

Relaciones con los propietarios y editores de revistas

La relación entre editores, editoriales y propietarios estará sujeta al principio de independencia editorial. **Tecnura** garantizará siempre que los artículos se publiquen con base en su calidad e idoneidad para los lectores, y no con vistas a un beneficio económico o político. En este sentido, el hecho de que la revista no se rija por intereses económicos, y defienda el ideal de libre acceso al conocimiento universal y gratuito, facilita dicha independencia.

Conflicto de intereses

Tecnura establecerá los mecanismos necesarios para evitar o resolver los posibles conflictos de intereses entre autores, evaluadores y/o el propio equipo editorial.

Quejas/denuncias

Cualquier autor, lector, evaluador o editor puede remitir sus quejas a los organismos competentes

The editorial board of *Tecnura* journal is committed to ethics high standards and good practice for knowledge dissemination and transfer, in order to ensure rigour and scientific quality. That is why it has taken as reference the Code of Conduct, which has been established by the Committee on Publication Ethics (COPE) for scientific journal editors; outlining the following:

General duties and responsibilities of the editorial board

As most responsible for the journal, **Tecnura** committee and the editorial board are committed to:

- Joining efforts to meet the readers and authors' needs.
- Tending to the continuous improvement of the Journal.
- Ensuring quality of published material.
- Ensuring freedom of expression.
- Maintaining the academic integrity of their content.
- Prevent commercial interests compromise intellectual standards.
- Post corrections, clarifications, retractions and apologies when necessary.
- Relations with readers.
- Readers will be informed about who has funded re- search and their role in the research.

Relations with authors

Tecnura is committed to ensuring the quality of published material, informing the goals and standards of the journal. The decisions of publishers to accept or reject a paper for publication are based solely on the relevance of the work, originality and pertinence of the study with journal editorial line. The journal includes a description of the process for peer evaluation of each received work, and has an authors guide with this information. The guide is regularly updated and contains a link to this code of ethics. The journal recognizes the right of authors to appeal editorial decisions. Publishers will not change their decision in accepting or rejecting articles, unless extraordinary circumstances or irregularities are detected. Any change in the editorial board members will not affect decisions already made, except for unusual cases where serious circumstances converge.

Relations with evaluators

Tecnura makes available to reviewers a guide to what is expected from them. Reviewers' identity is protected at all times, ensuring anonymity

Peer review process

Tecnura ensures that material submitted for publication will be considered private and confidential issue while being reviewed (double blind).

Claims

Tecnura is committed to respond quickly to complaints and ensure that dissatisfied claimant can process all complaints. In any case, if applicants fail to satisfy their claims, the journal considers that they have the right to raise their protests to other instances.

Promoting Academic Integrity

Tecnura ensures that the published material conforms to internationally accepted ethical standards.

Protection of individual data

Tecnura guarantees the confidentiality of individual information (e.g. participant teachers and/or students as collaborators or subjects of study in the presented research).

Tracking malpractice

Tecnura accepts the obligation to act accordingly in case of suspected malpractice or misconduct. This obligation extends both to publish and unpublished documents. The editors not only reject manuscripts with doubts about possible misconduct, but they are considered ethically obligated to report suspected cases of misconduct. From the journal every reasonable effort is made to ensure that works submitted for evaluation are rigorous and ethically appropriate.

Integrity and academic rigour

Whenever evidence that a published work contains significant misstatements, misleading or distorted statements, it must be corrected immediately

In case of any work with fraudulent content is detected, it will be removed as soon as it is known, and immediately informing both readers and indexing systems.

Practices that are considered unacceptable and as such will be reported: simultaneous sending of the same work to various journals, duplicate publication with irrelevant changes or paraphrase of the same work, or the artificial fragmentation of a work in several articles.

Relations with owners and journal editors

The relation between editors, publishers and owners will be subject to the principle of editorial independence. **Tecnura** will ensure that articles are published based on their quality and suitability for readers, and not for an economic or political gain. In this sense, the fact that the journal is not governed by economic interests, and defends the ideal of universal and free access to knowledge, provides that independence.

Conflict of interest

Tecnura will establish the necessary mechanisms to avoid or resolve potential conflicts of interest between authors, reviewers and/or the editorial board itself.

Complaints / allegations

Any author, reader, reviewer or editor may refer their complaints to the competent authorities.



La evolución de la innovación para las Instituciones de Educación Superior y sus retos

Editorial del Volumen 30 - Numero 89, 2026

Hoy en día, al abordar el rol de las Instituciones de Educación Superior (IES), se supera la concepción tradicional de la universidad como una mera entidad transmisora de conocimiento bajo modelos pedagógicos conductistas, donde el estudiante asumía un rol pasivo-receptor y el cuerpo docente junto a la literatura impresa poseían el saber «absoluto». Este paradigma ha sido transformado: las instituciones reestructuraron su dinámica y filosofía para posicionar la generación de nuevo conocimiento como eje misional. Para ello, consolidaron estructuras académicas orientadas al trabajo articulado, inter- y transdisciplinario a través de grupos y líneas de investigación. Esta dinámica impulsó a los programas de pregrado y posgrado a trascender las mallas curriculares y los créditos académicos, motivando a docentes y estudiantes a formular proyectos de I+D+i cuyos productos otorgan visibilidad, prestigio y estatus investigativo a escala nacional e internacional.

El acceso democrático a contenidos en línea, la aceleración tecnológica, la movilidad académica internacional hacia centros de excelencia y la cooperación interinstitucional han conducido a las universidades a una era enfocada en la formación de talento humano de alta calidad e integral. Este talento no solo asimila el conocimiento, sino que lo aplica en entornos laborales y comunitarios para dar respuesta a las demandas complejas del entorno. Sin embargo, esta evolución no se limita a la formación profesional. En el marco de su responsabilidad social y visión estratégica, las IES han adoptado un modelo donde la calidad trasciende la inserción laboral de sus egresados.

Actualmente, la excelencia académica exige un proceso de mejora continua articulado con estándares de acreditación nacional e internacional. En este contexto, la calidad institucional abarca la solidez de los procesos formativos, el bienestar universitario, la interacción con los sectores productivo, gubernamental y social (hélice cuádruple) y la cooperación internacional. En particular, la investigación, la innovación y el desarrollo tecnológico (I+D+i) se erigen como pilares esenciales para la transferencia de soluciones. Estos componentes funcionan como indicadores clave de impacto y relevancia, especialmente en el ámbito de la ingeniería, donde la capacidad de transformar la ciencia en desarrollos tecnológicos de alto valor agregado constituye un criterio central de contribución al desarrollo socioeconómico.

Desde esta perspectiva, las universidades no solo afrontan el reto del reconocimiento académico de alta calidad ante el Ministerio de Educación Nacional (MEN) y los organismos acreditadores internacionales, sino también el desafío de escalar en los indicadores de I+D+i supervisados por el Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación (MinCiencias) y los escalafones globales. Además de generar nuevo conocimiento, desarrollar tecnología y formar capital avanzado, cobran especial relevancia los procesos de Apropriación Social del Conocimiento (ASC). Por ello, los pares evaluadores indagan cómo los desarrollos científicos responden fehacientemente a las necesidades del sector productivo y la sociedad civil a partir de su validación en entornos reales. Esta exigencia ha impulsado la formulación de políticas, procedimientos y ecosistemas sólidos de Ciencia, Tecnología e Innovación (CTeI) en las universidades. En estos entornos, los proyectos con potencial de transferencia atraviesan los niveles de madurez tecnológica (*Technology Readiness Levels*, TRL 1 al 9) y de madurez comercial (*Business Readiness Level*, BRL 1 al 9). Esta ruta permite que los trabajos de grado y tesis sigan un itinerario de maduración que los transforme en tecnologías viables y, eventualmente, en productos comercializables.

Como resultado, las tecnologías desarrolladas en el ámbito universitario se transfieren hacia empresas, gremios y comunidades, o se materializan en la creación de empresas de base tecnológica (*spin-offs* y *start-ups*). Se constituye así un círculo virtuoso basado en el conocimiento para solucionar problemáticas reales, donde los retornos financieros derivados de la comercialización se reinvierten en los grupos de investigación y en la infraestructura científica de la institución.

Es fundamental destacar que este avance metodológico no solo ha dinamizado la innovación tecnológica, sino también la innovación social, involucrando actividades de co-creación y ASC con las comunidades. Esto ha propiciado el diseño de proyectos de innovación social guiados por los Niveles de Preparación Social (*Societal Readiness Levels*, SRL 1 a 9). En esta escala, se parte de la identificación del problema y el pilotaje de soluciones hasta alcanzar la validación integral y la apropiación por parte de los actores territoriales. El propósito final es la creación de capacidades locales autónomas y sostenibles en el tiempo, independientes de la presencia permanente de los investigadores.

Por lo expuesto, el compromiso de la comunidad investigadora radica en desarrollar ciencia pertinente que transforme y mejore el entorno, con responsabilidad ética y ambiental frente a la sociedad.

En coherencia con esta visión, el No. 89 de la revista *Tecnura* reúne contribuciones científicas centradas en la innovación aplicada, la sostenibilidad, la resiliencia y la transformación digital en ingeniería. Los artículos de esta edición evidencian la convergencia de tecnologías como la fotogrametría mediante vehículos aéreos no tripulados (VAV/UAV), el modelado de información de construcción (BIM), la síntesis de biomateriales (como la hidroxiapatita para aplicaciones de inertización) y la analítica computacional educativa, empleando herramientas de código abierto y bajo costo. Estas aportaciones articulan metodologías de vanguardia para el diagnóstico y mitigación de riesgos en infraestructuras viales,

fluviales y mineras críticas. Asimismo, impactan el sector educativo con plataformas para la gestión asíncrona y el aprendizaje autónomo en cartografía de coberturas, promueven la transición energética y la valorización de subproductos industriales, y robustecen la toma de decisiones informada. De este modo, la publicación consolida soluciones integrales frente a los desafíos socioecológicos e industriales de la región, fortaleciendo la democratización tecnológica y la evidencia digital reproducible.

Invitamos a la comunidad académica e investigadora a someter sus manuscritos, expresando nuestro agradecimiento a los autores por confiar sus hallazgos a *Tecnura*, a los evaluadores por su rigor analítico y a nuestros lectores por consolidar a esta revista como un referente de la CTel con impacto social.

Cordialmente,

Yolanda Torres Pérez
Directora General de Investigaciones
Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia

Lely A. Luengas-C.
Editora Revista Tecnura
Universidad Distrital Francisco José de Caldas



Nota de la Editora

1

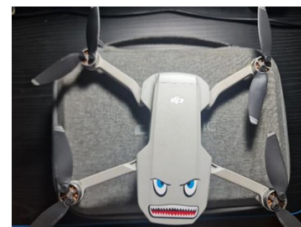
Diseño y desarrollo inicial de un objeto virtual de aprendizaje para el aprendizaje autónomo en la elaboración de mapas de uso y cobertura del suelo
Design and Initial Development of a Virtual Learning Object for Self-Directed Learning in Land-Use and Land-Cover Mapping
Jose Antonio Valero Medina, Jose Luis Herrera Escorcia

4



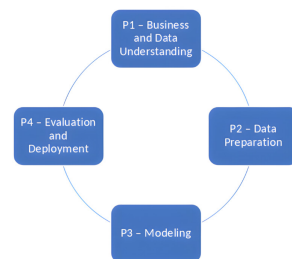
Reconstrucción tridimensional y modelado BIM del Coliseo El Salitre mediante fotogrametría UAV para la preservación patrimonial
Three-dimensional reconstruction and BIM modeling of the El Salitre Coliseum using UAV photogrammetry for heritage preservation
Andrés Castillo-Velásquez, Nicolás Stiven Gutiérrez-Ariza, Alexander Cerón-Correa

21



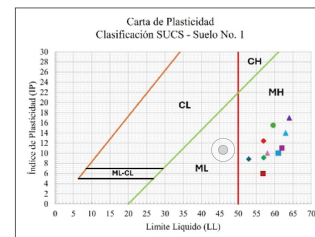
Caracterización y predicción de la radiación solar en el municipio de Mompo-Bolívar usando modelos de series de tiempo
Characterization and prediction of solar radiation in the municipality of Mompo-Bolívar using time series models
Gabriel Elías Chanchí-Golondrino, Manuel Alejandro Ospina-Alarcón, Álvaro Realpe-Jiménez

47



Análisis comparativo de la estabilización de suelos derivados de ceniza volcánica con cal, ceniza de fondo y estabilizante comercial
Comparative analysis of volcanic ash-derived soil stabilization using lime, brick slag ash, and a commercial stabilizer
Laura Alejandra Muñoz, Isabella Rodríguez Castroa, Andrea Carolina Paredes Cerón, Lucio Gerardo Cruz Velasco

72

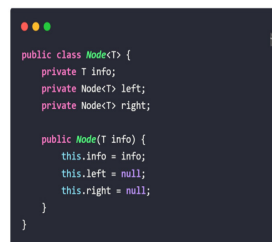




Integración del tiempo de reacción serial visual y árboles de decisión binaria para la evaluación del aprendizaje implícito: una prueba de concepto metodológica

89

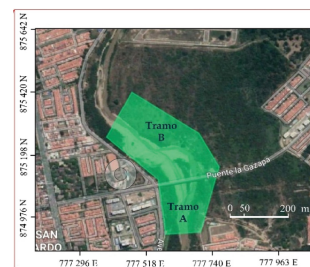
Integrating Visual Serial Reaction Time and Binary Decision Trees for the Evaluation of Implicit Learning: A Methodological Proof of Concept
Iván F. Leal Ramírez, Henry Montaña Quintero, Eduardo Avendaño Fernández



Evaluación de la pérdida de sedimento del río Pamplonita en el sector “La Gazapa”, mediante datos satelitales y fotogrametría aérea

107

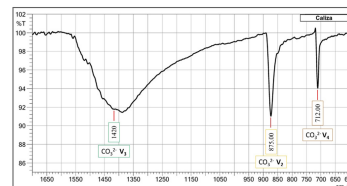
Assessment of sediment loss from the Pamplonita River in the “La Gazapa” sector, using satellite data and aerial photogrammetry
Carlos Alexis Bonilla Granados, Jarol Derley Ramón Valencia, Diego Iván Sánchez Tapiero



Hidroxiapatita: material alternativo en la inertización de polvo de carbón en minas subterráneas

121

Hydroxyapatite as an Alternative Inerting Material for Underground Coal-Dust Control
Juliana Andrea Chaparro Laguado, Adriana del Pilar Castañeda Rojas, Kevin Leandro Rosas Barrera



Design and Initial Development of a Virtual Learning Object for Self-Directed Learning in Land-Use and Land-Cover Mapping

Diseño y desarrollo inicial de un objeto virtual de aprendizaje para el aprendizaje autónomo en la elaboración de mapas de uso y cobertura del suelo

José Antonio Valero Medina ¹, José Luis Herrera Escorcía ²,

Fecha de Recepción: 23 de marzo de 2023

Fecha de Aceptación: 16 de abril de 2026

Cómo citar: J. A. Valero-Medina and J. L. Herrera-Escorcía, "Design and initial development of a virtual learning object for self-directed learning in land-use and land-cover mapping," *Tecnura*, 30(89), 4-17. <https://doi.org/10.14483/22487638.20628>

ABSTRACT

Objective: To design and implement the first phase of a virtual learning object (VLO) that supports asynchronous interaction between tutors and students and enables quality assessment of student-produced land-use and land-cover maps.

Methodology: An open-source web environment was developed to manage the learning process from the initial assignment to final submission. The environment supports automated assessment of geometric and semantic consistency.

Results: The environment was tested with students in the GEIPER Remote Sensing and Geographic Information Systems research group, which is affiliated with the NIDE Spatial Data Research Group at Universidad Distrital Francisco José de Caldas. The tests used recent 0.5 m-resolution Capella radar imagery of Cáqueza, Cundinamarca, Colombia, and involved students in Cadastral Engineering and Geodesy.

Conclusions: The tests indicate that the proposed environment is a sustainable alternative for improving teaching and learning in the Earth sciences, particularly the development of skills required to produce high-quality land-use and land-cover maps.

Keywords: land-cover mapping, land-use mapping, semantic segmentation, self-directed learning, virtual learning object

¹PhD in Engineering; MSc in Teleinformatics; specialist in computer-network software; systems engineer. Professor, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá, Colombia. Email: jvalero@udistrital.edu.co

²MSc in Geography; specialist in Geographic Information Systems; cadastral and geodetic engineer. Professor, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá, Colombia. Email: jherrera@udistrital.edu.co

RESUMEN

Objetivo: Diseñar e implementar la primera fase de un objeto virtual de aprendizaje (OVA) que facilite la interacción asín-crona entre tutores y estudiantes y permita evaluar la calidad de los mapas de uso y cobertura del suelo elaborados por los estudiantes.

Metodología: Se desarrolló un entorno web de código abierto para gestionar el proceso de aprendizaje desde la asignación inicial hasta la entrega final. El entorno permite evaluar de manera automatizada la consistencia geométrica y semántica.

Resultados: El entorno se probó con estudiantes del semillero de investigación GEIPER en Teledetección y Sistemas de Información Geográfica, adscrito al grupo de investigación NIDE en Datos Espaciales de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Las pruebas utilizaron imágenes de radar recientes de Capella, con una resolución de 0,5 m, correspondientes a Cáqueza, Cundinamarca, Colombia, y contaron con la participación de estudiantes de Ingeniería Catastral y Geodesia.

Conclusiones: Las pruebas indican que el entorno propuesto constituye una alternativa sostenible para mejorar los procesos de enseñanza y aprendizaje en ciencias de la Tierra, en particular el desarrollo de las competencias necesarias para producir mapas de uso y cobertura del suelo de alta calidad.

Palabras clave: aprendizaje autónomo, mapas de cobertura del suelo, mapas de uso del suelo, objeto virtual de aprendizaje, segmentación semántica

INTRODUCTION

Land-use and land-cover maps are essential tools for governments and nongovernmental organizations because they reveal changes on the Earth's surface and support the allocation of limited resources under local, national, and international land-use plans. Producing these maps requires both theoretical knowledge and practical expertise. Practitioners must select an appropriate classification ontology, level of detail, and minimum mapping unit for each study. In conventional teaching and learning processes, tutors must therefore monitor students individually to determine whether they have acquired the expertise required to complete such projects independently.

This paper presents the first phase in the development of an open-source VLO that supports asynchronous interaction between tutors and students and assesses the geometric and semantic quality of student-produced land-use and land-cover maps. A web-based environment manages the process from the initial assignment to final submission and automates consistency assessment using the boundary-based evaluation framework introduced in [1]. The environment was tested in the GEIPER Remote Sensing and Geographic Information Systems research group, which is affiliated with the NIDE Spatial Data Research Group at Universidad Distrital Francisco José de Caldas.

The initial implementation used recent 0.5 m-resolution Capella radar imagery of the municipality of Cáqueza, Cundinamarca, Colombia, with students in Cadastral Engineering and Geodesy. The

results support the proposed environment as a sustainable means of improving teaching and learning in the Earth sciences, particularly for the challenging task of developing the skills needed to produce high-quality spatial information. Although the present work focuses on land-use and land-cover mapping, the environment can be adapted to teach basic and thematic cartography.

The remainder of this paper reviews the relevant background, describes the datasets and methodology, presents the results, and concludes with limitations and directions for future work.

BACKGROUND

Virtual learning objects are increasingly used to support teaching and learning by promoting learner autonomy and knowledge management. Mejias et al. [2] implemented VLOs in higher education to complement synchronous instruction, monitor learning activities, and develop generic competencies such as autonomous learning and knowledge management. Their results indicate that greater use of information and communication technology (ICT) in higher education can improve academic performance. Following this approach, the present study uses a VLO to support the photointerpretation of digital Earth-surface imagery and to enable self-assessment in both tutor–student and collective knowledge-construction settings.

Nurbekova et al. [3] reviewed studies indexed in Web of Science, Google Scholar, and Scopus and found that VLOs can improve student learning. Their pedagogical experiment examined the effects of VLOs on educational content and learning outcomes, treating these objects not only as instructional resources but also as mechanisms for assessing acquired knowledge. The present research extends this line of work to land-use and land-cover mapping.

The evaluation frameworks proposed in [1, 4] provide an empirical basis for validating the quality of segmentations produced by image-segmentation algorithms. They score boundary-detection results, thereby enabling comparisons among different segmentations of the same image. The method can be applied to any dataset containing segment boundaries.

Building on these studies, the proposed framework determines how closely the boundary map of one segmentation matches the boundaries of another segmentation of the same image, whether or not the latter is treated as ground truth. The comparison produces two measures: precision and recall. Precision indicates the proportion of detected boundaries that correspond to boundaries in the

comparison segmentation and therefore reflects boundary noise. Recall indicates the proportion of boundaries in the comparison segmentation that are recovered and therefore reflects the degree of agreement between the two segmentations.

Martin et al. [1] summarize segmentation performance with the F-measure, the harmonic mean of precision and recall. The extended framework presented by Arbeláez et al. [4] includes three additional metrics: the optimal dataset scale (ODS), which is the best F-measure obtained using a fixed scale for the entire dataset; the optimal image scale (OIS), which aggregates the best F-measure obtained separately for each image; and average precision (AP), equivalent to the area under the precision–recall curve.

In 2010, the International Federation of Surveyors (FIG) promoted e-learning for the education and continuing professional development of surveyors [5]. This policy implied substantial and inclusive changes in educational institutions, programs, and courses related to land administration. Groenendijk et al. [6] argued that these changes should strengthen institutional capacity in both the public and private sectors while improving individual assessment and professional-development capabilities.

The present proposal aims to strengthen professional capacity, initially among cadastral and geodetic engineers in Colombia, through a virtual library that supports comparison of segmentations derived from optical and radar imagery. The initial experiments used Capella radar imagery of a Colombian municipality [7]. The imagery was made available under a 2020 agreement between Universidad Distrital Francisco José de Caldas and Procalculo Prosis S.A.S. for analyzing radar data used to produce and update maps of rural homogeneous physical zones. The broader project included land-use and land-cover mapping, stereoscopic image products, digital elevation models, geocoded imagery, and slope maps.

During tests with student researchers at Universidad Distrital Francisco José de Caldas, the image bank was evaluated not only as a resource for professionals assessing segmentation software but also as a VLO for the Radar Systems course. The results reported here arise from that educational setting, although the environment may also support cooperative and collaborative work by professional teams.



Figure 1. RADARSAT-2 image used in the tutor–student reference-segmentation experiment.

Source: Authors' data.

DATA

Two satellite images were used in the segmentation experiments. For the tutor–student approach, a 2015 RADARSAT-2 image of the Bogotá savanna in Cundinamarca was assigned to six students enrolled in the Radar Systems course (Fig. 1); its metadata are listed in Table 1.

The semantic level of detail corresponded to level 2 of the field-classification system established by the Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC).

For the collective knowledge-construction approach, a Capella radar image of the municipality

of Cáqueza, Cundinamarca, was used [7]. The image (Fig. 2) was segmented by students in two iterations; four students participated in the second iteration. Table 2 lists the image metadata.

Table 1. RADARSAT-2 image metadata

Item	Value
SAR Frequency Band	C
Instruments	Radarsat-2
Datetime	2015-06-09T23
SAR Instrument	Mode Ultrafine
SAR Center Frequency	5.404 GHz
SAR Polarizations	HH
SAT	Orbit state: descending
SAR Product Type	SGF
SAR Pixel Spacing Range & Azimuth	1.56 m
SAR Looks Range	1
SAR Looks Azimuth & Equivalent Number	1
SAR Resolution Range	1.6 m
Resolution Ground Range	4.6 m
SAR Resolution Azimuth	2.8 m
Incidence, Look & Squint Angles	34.7°, 37.6°, -0.0001°
Orbital Plane	97°
SAR Observation Direction	Right
Collect Id	PDS 04838400
Product Category	custom
Billable Area	400000000

Source: Authors' data.



Figure 2. Capella radar image used in the collective knowledge-construction experiment.

Source: [7].

For this experiment, the semantic level of detail corresponded to level 3 of the IGAC classification system.

METHODOLOGY

Because the framework in [1] assesses segmentation geometry by comparing detected boundaries with reference boundaries, the proposed self-directed learning tool adopts two complementary approaches: (i) assessing the relative consistency of a segmentation against a reference set and (ii) assessing the internal consistency of a set by comparing every pair of segmentations. Thematic consistency was calculated from confusion matrices with 95 % confidence intervals. For brevity, the figures in the Results section report only overall thematic consistency.

The first approach enables a tutor to assess student performance by comparing the student's segmentation with a reference segmentation. The second compares every pair of segmentations in a set and thus supports collective knowledge construction: students can observe the consistency of the group output. Low consistency indicates substantial disagreement, whereas high consistency

indicates convergence toward a shared interpretation.

The system architecture was designed to support asynchronous work by tutors and students, collective knowledge construction, access without proprietary software, and basic security requirements that permit sustainable growth of the user community. The adopted architecture and assessment process are described below.

The architecture comprises three main components (Fig. 3): (i) a web portal that integrates file

Table 2. Capella radar image metadata

Item	Value
SAR Frequency Band	X
Instruments	capella-radar-3
Datetime	2021-06-12T14:48:43.343984
SAR Instrument	Mode spotlight
SAR Center Frequency	9.65 GHz
SAR Polarizations	HH
SAT	Orbit state: descending
SAR Product Type	GEO
SAR Pixel Spacing Range & Azimuth	0.42 m
SAR Looks Range	1
SAR Looks Azimuth & Equivalent Number	9
SAR Resolution Range	0.5 m
Resolution Ground Range	0.74 m
SAR Resolution Azimuth	0.64 m
Incidence, Look & Squint Angles	41.9°, 38.1°, -0.1°
Orbital Plane	97°
SAR Observation Direction	left
Collect Id	6cf322d2-3935-4803-a587-d8dae7295005
Product Category	custom
Billable Area	25567987.965252765

Source: [7].

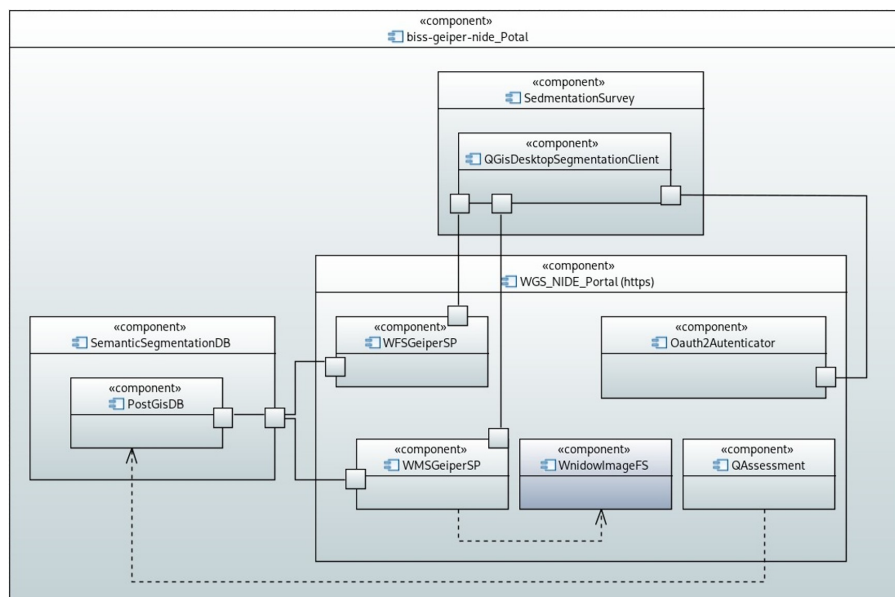


Figure 3. System architecture for accessing and producing reference semantic segmentations through a WFS server. The three main components are the segmentation resources for each user, the web portal that provides the services, and the data repository.

Source: Authors.

storage, Web Map Service (WMS) and Web Feature Service (WFS) servers, and a quality-assessment environment; (ii) a segmentation environment based on the QGIS Desktop client; and (iii) a semantic-segmentation repository implemented in PostgreSQL with the PostGIS extension.

QGIS Desktop client

After a student account has been enabled, the assigned image can be segmented in any client that accesses WMS and WFS servers in accordance with Open Geospatial Consortium standards and supports OAuth 2.0 authentication. QGIS Desktop was selected for the implemented framework (Fig. 3) because it is widely used and meets these requirements.

The student imports an OAuth 2.0 configuration file containing the connection settings for the WMS and WFS servers; alternatively, the connection can be configured manually. Google provides the authentication service through the institutional accounts issued by the university to members of its academic community.

After authentication, the student accesses the assigned Earth-surface image through the WMS

server and creates the segmentation through the WFS server. The completed segmentation is returned through the WFS server for storage and subsequent consistency assessment. In the collective knowledge-construction configuration, the WMS server can also display segmentations created by other students assigned to the same image.

Web Geographic Server for NIDE Portal (WSG-NIDE-Portal)

The framework uses HTTPS to protect connection confidentiality through a public–private key pair provided by Universidad Distrital Francisco José de Caldas. The site also uses server-side OAuth 2.0 authentication [8], with Google as the identity provider for institutional accounts through the OAuth2Authenticator component.

Each segmentation layer assigned to a student is provided by the WFS server (WFSGeiperSP), ensuring that only the user with the corresponding credentials can edit it. The WMS server (WMS-GeiperSP) provides the Earth-surface image and the segmentation layers for visualization.

Under the tutor–student approach, each student can access only the assigned image and their own segmentation layer. When collective knowledge construction is enabled, students can also view segmentations created by peers assigned to the same image. In the current implementation, each Earth-surface image is stored in a file system (WindowImageFS) accessible to the website.

Once a segmentation (tutor–student approach) or a set of segmentations (collective approach) is available in the spatial database (SemanticSegmentationDB), the consistency-assessment environment (QAssessment) produces the corresponding quality measures. The tests implement the framework of [4]. In the current version, each assessment is initiated manually in MATLAB through the API associated with that framework.

Semantic Segmentation Database (SemanticSegmentationDB)

Each segmentation is stored in a PostGIS repository (PostGisDB) implemented with the open-source PostgreSQL database management system and its PostGIS extension. Every authorized student has an individual schema for storing their work, while segmentation groups link the outputs of students assigned to the same image. Under the tutor–student approach, the tutor has a separate schema containing the reference segmentation.

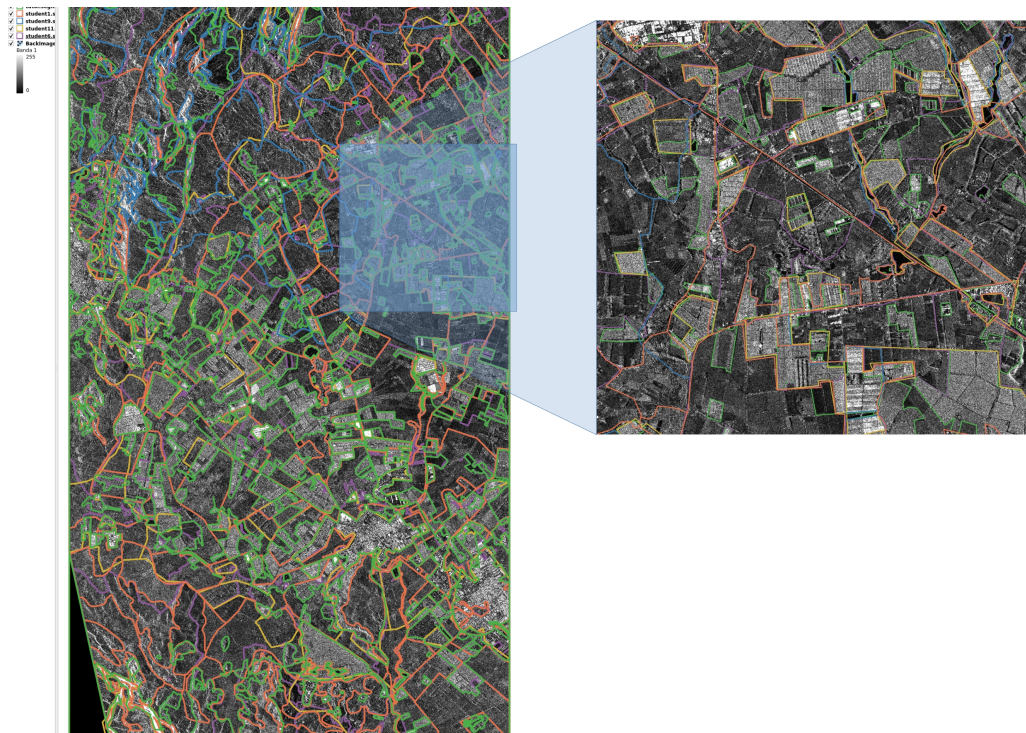


Figure 4. Image and four student-produced segmentations (left) and enlargement of the blue rectangle (right). The reference segmentation is shown in green behind the student outputs.

Source: Authors.

RESULTS

The current implementation was evaluated using both the tutor–student and collective approaches. In the former, consistency measures provide feedback on student performance relative to the tutor’s reference segmentation. Figure 4 shows the reference segmentation and four representative student outputs from this experiment.

Figure 4(left) superimposes the four student segmentations on the reference segmentation. Non-green lines indicate boundaries that do not match the reference and therefore reduce precision. In Fig. 4(right), green reference boundaries not covered by a student segmentation correspond to missed boundaries and therefore reduce recall. These patterns are consistent with the quantitative results in Fig. 5. Red points indicate measured performance, whereas the green point marks the ideal location in precision–recall space, which is adopted here for Earth-surface imagery.

Figure 5 shows each student’s performance relative to the tutor’s reference segmentation, repre-

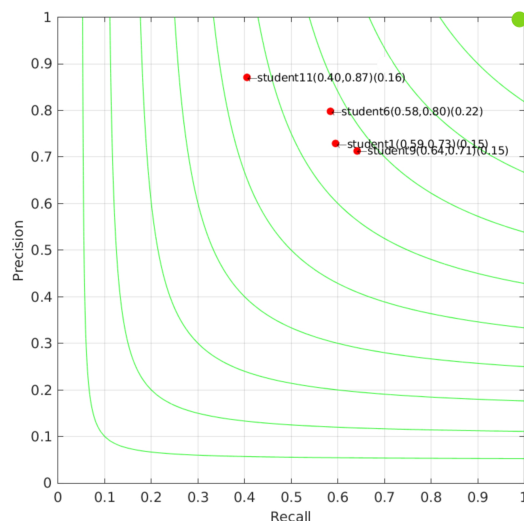


Figure 5. Precision–recall consistency results for four segmentations produced under the tutor–student approach.

Source: Authors.

sented by the bright-green point. Each red point has the same label as the corresponding segmentation in Fig. 4; the first parenthetical values give the recall and precision coordinates, and the second value gives overall thematic consistency. In addition to reporting performance, the method provides a more objective form of feedback than conventional qualitative assessment and helps students identify corrections for subsequent work.

The implementation was also evaluated using the collective knowledge-construction approach, although students could not view their peers' segmentations during the experiments. Two segmentation iterations were completed. Figure 6 shows the source image and the four segmentations produced in the second iteration, which exhibit substantial pairwise similarity.

For each iteration, precision and recall were averaged across all possible pairs of segmentations; the resulting averages are shown as magenta points in Fig. 7. The figure also reports the consistency of each segmentation relative to the remaining outputs (blue or green points in the first iteration and red points in the second). For the second iteration, the precision–recall coordinates appear beside each segmentation label, which corresponds to Fig. 6; the average point is additionally annotated with overall thematic consistency.

The closer the average lies to the upper-right corner of precision–recall space, the greater the

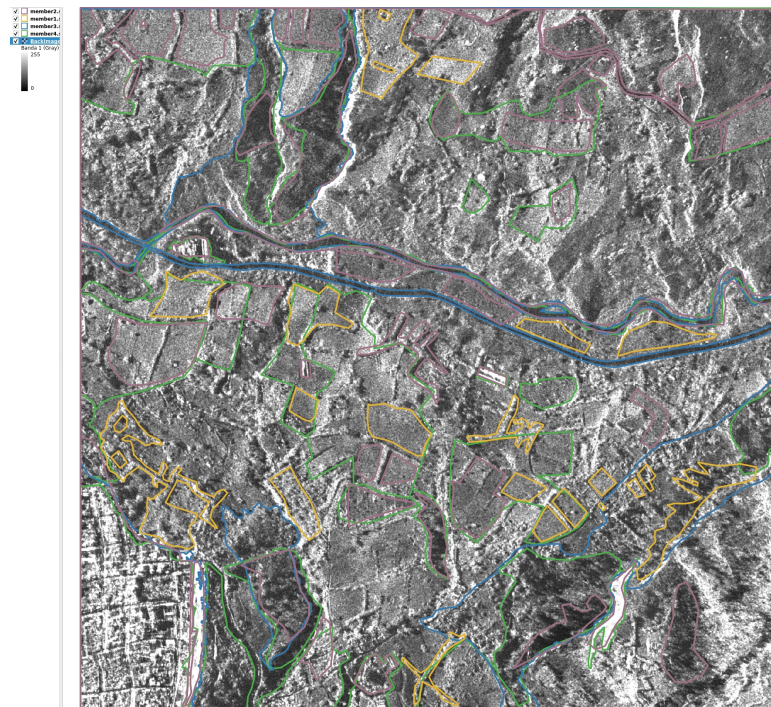


Figure 6. Source image and four segmentations produced in the second iteration of the collective knowledge-construction experiment.

Source: Authors.

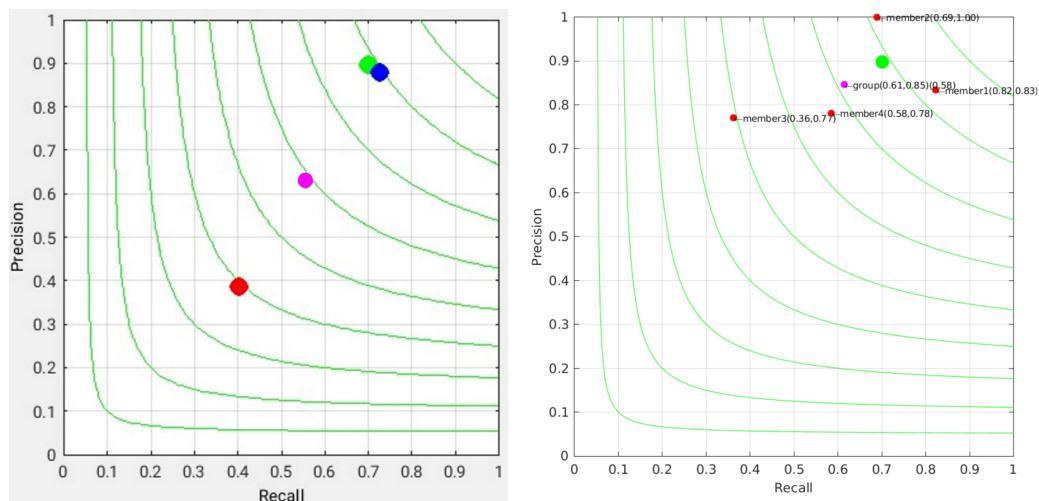


Figure 7. Precision–recall consistency results for four segmentations in the collective knowledge-construction experiment: first iteration (left) and second iteration (right).

Source: Authors.

agreement among the semantic interpretations expressed by the group. As Fig. 7 shows, the group improved its overall precision–recall performance in the second iteration.

CONCLUSIONS AND FUTURE WORK

This study conducted a series of pilot experiments involving manual segmentation. The variation among segmentations of the same Earth-surface image shows that high internal consistency can be difficult to achieve. Nevertheless, the improvement observed between the two iterations suggests that objective comparative feedback can help students refine their semantic segmentations in subsequent attempts. This iterative process can strengthen both their geographic knowledge of the assigned area and their image-interpretation skills.

In the collective knowledge-construction experiment, the group received its aggregate performance results and reviewed the other segmentations after the first iteration. The second iteration subsequently achieved better performance, as shown in Fig. 7. The increase was more pronounced for precision, although recall also improved.

During each iteration of the collective experiment, students could not view their peers' segmentations while working. Consequently, they could not use those interpretations to adjust their own output or contribute interactively to a shared result. A future experiment will enable this functionality to test whether peer visibility further improves collective consistency.

Precision and recall were calculated in MATLAB using the implementations associated with [1,4]. An adaptation for GNU Octave is under development as a fully open-source alternative.

The experiments yielded relative consistency measures based on each participant's precision and recall, but the number of photointerpreters was small. The resulting set therefore lacks the diversity of independent interpretations assumed in [1,4]. Although the experiments demonstrate the utility of the computational environment, substantially more photointerpreters are required before the resulting dataset can be considered a reliable ground truth for evaluating semantic-segmentation algorithms.

A major obstacle in semantic-segmentation research is the need for large labeled datasets, whose production by photointerpreters is labor-intensive and costly. For human detection, Shen et al. [9] proposed Progressive Transformation Learning (PTL), in which increasingly realistic transformed

virtual images are added gradually to an initial training set. Tian et al. [10] described a method for designing artificial scenes and automatically producing accurately annotated images; their ParallelEye dataset improved model performance when combined with public real-world datasets during training. Applying similar methods to Earth-surface segmentation could reduce the cost of producing labeled data. However, generating realistic Earth-surface imagery remains difficult because scenes contain multiple object classes with diverse geometric and textural characteristics.

The experiments required several segmentation groups to be configured manually, from creating repository schemas to enabling the websites through which datasets were provided. Automating this workflow is therefore an important step toward simplifying and decentralizing system administration.

The experiments used the Radar Systems course as their educational context and the IGAC taxonomy as their semantic classification system. Because both elements are configurable, the framework can be adapted to other Earth-surface semantic-segmentation contexts and extended through additional VLOs.

The datasets, including the images and generated segmentations, are available through the university website at <https://biss-geiper-nide.udistrital.edu.co>. Access to the required WMS, Web Map Tile Service (WMTS), Web Coverage Service (WCS), and WFS endpoints can be requested by emailing geiper@udistrital.edu.co. QGIS Desktop plugins for uploading, downloading, and evaluating semantic segmentations are available upon request through the same address. Ongoing work will extend the platform to manage semantic-segmentation projects in additional geographic areas.

SPONSORSHIP

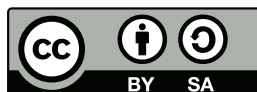
This work was supported by Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá, Colombia.

REFERENCIAS

- [1] D. Martin, C. Fowlkes, D. Tal, and J. Malik, "A database of human segmented natural images and its application to evaluating segmentation algorithms and measuring ecological statistics,"

- in *Proc. 8th IEEE Int. Conf. Computer Vision (ICCV)*, Vancouver, BC, Canada, 2001, vol. 2, pp. 416–423, doi: <https://doi.org/10.1109/ICCV.2001.937655>.
- [2] P. Mejias, O. Herrera, A. Mellado, and M. Faundez, “Virtual learning objects and LMS, a strategic alliance between the teaching-learning process and generic competences,” in *Proc. XVI Latin American Conf. Learning Technologies (LACLO)*, Arequipa, Peru, 2021, pp. 546–549, doi: <https://doi.org/10.1109/LACLO54177.2021.00099>.
- [3] Z. Nurbekova, B. Nurbekov, M. Maulsharif, D. Naimanova, and A. Baimendinova, “Using virtual learning objects in educational content,” in *Proc. 23rd Int. Conf. Computer Systems and Technologies (CompSysTech '22)*, Ruse, Bulgaria, 2022, pp. 174–178, doi: <https://doi.org/10.1145/3546118.3546138>.
- [4] P. Arbeláez, M. Maire, C. Fowlkes, and J. Malik, “Contour detection and hierarchical image segmentation,” *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, vol. 33, no. 5, pp. 898–916, May 2011, doi: <https://doi.org/10.1109/TPAMI.2010.161>.
- [5] International Federation of Surveyors, *Enhancing Surveying Education through e-Learning*, FIG Publication no. 46. Copenhagen, Denmark: FIG, 2010. [Online]. Available: <https://www.fig.net/resources/publications/figpub/pub46/figpub46.pdf>
- [6] L. Groenendijk, P. van der Molen, C. Lemmen, and T. Wubbe, “E-learning: The future for land administration studies?” in *Proc. XXIV FIG Int. Congress: Facing the Challenges—Building the Capacity*, Sydney, Australia, 2010. [Online]. Available: https://www.fig.net/resources/proceedings/fig_proceedings/fig2010/papers/ts06g/ts06g_groenendijk_lemmen_et_al_3935.pdf
- [7] Capella Space, “Synthetic aperture radar data.” [Online]. Available: <https://www.capellaspace.com/solution/sar-data>. [Accessed: Aug. 18, 2026].
- [8] S. Rahman, N. Hossain, M. A. Hossain, and M. Hossain, “OAuth 2.0: A framework to secure the OAuth-based service for packaged web application,” in *Innovative Perspectives on Interactive Communication Systems and Technologies*, M. Sarfraz, Ed. Hershey, PA, USA: IGI Global, 2020, ch. 5, pp. 92–139, doi: <https://doi.org/10.4018/978-1-7998-3355-0.ch005>.

- [9] Y.-T. Shen, H. Lee, H. Kwon, and S. S. Bhattacharyya, "Progressive transformation learning for leveraging virtual images in training," in *Proc. IEEE/CVF Conf. Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, Vancouver, BC, Canada, 2023, pp. 835–844, doi: <https://doi.org/10.1109/CVPR52729.2023.00087>.
- [10] Y. Tian, X. Li, K. Wang, and F.-Y. Wang, "Training and testing object detectors with virtual images," *IEEE/CAA J. Autom. Sinica*, vol. 5, no. 2, pp. 539–546, Mar. 2018, doi: <https://doi.org/10.1109/JAS.2017.7510841>.





Reconstrucción tridimensional y modelado BIM del Coliseo El Salitre mediante fotogrametría UAV para la preservación patrimonial

Three-dimensional reconstruction and BIM modeling of the El Salitre Coliseum using UAV photogrammetry for heritage preservation

Andrés Castillo-Velásquez ¹, Nicolás Stiven Gutiérrez-Ariza ², Alexander Cerón-Correa ³

Fecha de Recepción: 25 de enero de 2025

Fecha de Aceptación: 20 de junio de 2026

Cómo citar: A., Castillo-Velásquez, N., Gutiérrez-Ariza, A., Cerón-Correa, «Reconstrucción tridimensional y modelado BIM del Coliseo El Salitre mediante fotogrametría UAV como base para la preservación patrimonial», *Tecnura*, vol. 30, n.º 89, jul. 2026. 21–46. <https://doi.org/10.14483/22487638.23181>

Resumen

Objetivo: Proponer una metodología para la implementación de tecnologías digitales, como CAD/BIM (Building Information Modeling), a partir de la fotogrametría con drones, para mejorar la evaluación y promover la preservación del patrimonio arquitectónico, utilizando el Coliseo El Salitre en Bogotá (Colombia) como caso de estudio.

Metodología: El proceso desarrollado en este trabajo está dividido en fases: (i) planificación del vuelo, (ii) generación de la nube de puntos, (iii) evaluación de la reconstrucción mediante una estación total para establecer la calidad del modelo obtenido a partir de las condiciones usadas para la fotogrametría con drones, (iv) identificación de áreas críticas, (v) creación del modelo BIM y (vi) evaluación de los beneficios del proceso.

Resultados: La integración de la fotogrametría con drones y el BIM permitió la creación de un modelo 3D del coliseo, lo que facilitó una evaluación visual exhaustiva de su estado de conservación exterior. Los resultados destacan las ventajas significativas de combinar estas tecnologías para la conservación sostenible del patrimonio arquitectónico, particularmente en el fortalecimiento de la identidad nacional y la promoción del turismo.

Conclusiones: El uso de drones, software de fotogrametría y herramientas CAD/BIM permite la digitalización y evaluación del patrimonio cultural al proporcionar visualizaciones externas precisas que facilitan la planificación de la renovación. Esta metodología promueve el cuidado de la integridad estructural de los edificios patrimoniales y también su impacto socioeconómico a través del turismo y la preservación cultural. El estudio de caso destaca el potencial transformador de la integración de tecnologías digitales en proyectos de conservación del patrimonio.

Palabras clave: reconstrucción 3D, digitalización, patrimonio cultural, BIM, CAD, fotogrametría, drones, nubes de puntos, Coliseo El Salitre, UAV.

1 Ingeniero Civil (Universidad Militar Nueva Granada).  Miembro del semillero SIVICO. Email: est.andres.castillo3@unimilitar.edu.co

2 Ingeniero Civil (Universidad Militar Nueva Granada).  Miembro del semillero SIVICO. Email: est.nicolass.gutie2@unimilitar.edu.co

3 Ingeniero de Sistemas e Ingeniero Mecatrónico, Magister en Ingeniería Electrónica, Magister y Doctor en Ingeniería de Sistemas y Computación. Profesor asociado de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Militar Nueva Granada.  Líder del grupo de Investigación ACCEDER. Trabaja en las áreas de Computación Gráfica, Visión por Computador y Matemáticas Aplicadas. Email: alexander.ceron@unimilitar.edu.co

Abstract

Objective: To propose a methodology for the implementation of digital technologies, such as CAD/BIM (*Building Information Modeling*), based on drone photogrammetry, to improve the assessment and promote the preservation of architectural heritage, using the El Salitre Coliseum in Bogotá, Colombia, as a case study.

Methodology: The process developed in this work is divided into phases: (i) flight planning; (ii) point cloud generation; (iii) evaluation of the reconstruction using a total station to establish the quality of the model obtained under the conditions used for drone photogrammetry; (iv) identification of critical areas; (v) creation of a BIM model; and (vi) evaluation of the benefits of the process.

Results: The integration of drone photogrammetry and BIM enabled the creation of a 3D model of the Coliseum, facilitating a comprehensive visual assessment of its exterior state of conservation. The results highlight the significant advantages of combining these technologies for the sustainable conservation of architectural heritage, particularly in strengthening national identity and promoting tourism.

Conclusions: The use of drones, photogrammetry software, and CAD/BIM tools enables the digitization and assessment of cultural heritage by providing accurate external visualizations that facilitate renovation planning. This methodology promotes both the structural integrity of heritage buildings and their socioeconomic impact through tourism and cultural preservation. This case study highlights the transformative potential of integrating digital technologies into heritage conservation projects.

Keywords: 3D reconstruction, digital cultural heritage, BIM, CAD, photogrammetry, drone, point cloud processing, El Salitre Coliseum, UAV.

Introducción

El patrimonio tangible es fundamental para preservar la identidad, impulsar el desarrollo, promover la educación y proteger el medio ambiente. Infraestructuras icónicas como puentes, rascacielos y estadios, junto con espacios educativos como bibliotecas y museos, constituyen recursos valiosos para el aprendizaje, la investigación y el turismo. No obstante, uno de los principales desafíos en su conservación es la falta de información detallada sobre su diseño original y su estado actual. Esta carencia suele derivar en intervenciones de mantenimiento inadecuadas que causan daños irreparables y propician que estos bienes culturales queden relegados al olvido, perdiendo su valor social y patrimonial.

Ante esta problemática, la digitalización precisa de las características geométricas, la superficie física externa y el contexto histórico de las estructuras resulta crítica en la gestión, conservación y restauración ejecutada por entidades como el Ministerio de Cultura o el Instituto Distrital de Patrimonio Cultural (IDPC). Por ello, el desarrollo de modelos digitales tridimensionales estructurados se consolida como un requisito indispensable en la documentación del patrimonio cultural e histórico.

En la literatura especializada se registran procedimientos para la representación de fachadas mediante modelos 3D de alta calidad y texturas de resolución arbitraria, orientados a obtener interpretaciones visuales rigurosas [1]. Estos enfoques integran análisis semánticos para derivar automáticamente

dimensiones y proporciones arquitectónicas, lo que facilita la modelación de fachadas complejas. Sin embargo, al tratarse de métodos interactivos, requieren una supervisión humana considerable, circunstancia que limita su aplicabilidad en proyectos de gran escala [2].

Para superar estas limitaciones se han desarrollado métodos automatizados que emplean secuencias de imágenes superpuestas, capturadas a nivel de calle, con el fin de generar modelos 3D fotorrealistas [2]. Este abordaje combina la segmentación semántica y la partición sistemática para producir reconstrucciones detalladas, superando los sesgos de la fotogrametría aérea. De forma paralela, han emergido técnicas de mayor precisión basadas en sensores LiDAR para la generación de nubes de puntos [3]. Si bien estos sistemas ofrecen métricas de alta fidelidad, sus costos de implementación siguen siendo elevados; en consecuencia, el uso combinado de cámaras convencionales y vehículos aéreos no tripulados (drones) se posiciona como una alternativa versátil y accesible.

La fotogrametría digital y la visión por computador se han utilizado ampliamente en la digitalización del patrimonio mediante la técnica de estructura a partir del movimiento (*Structure from Motion*, SfM). Un hito relevante en el desarrollo de esta tecnología fue la aparición del software PMVS (*Patch-based Multi-View Stereo*), el cual permite reconstruir modelos 3D a partir de múltiples imágenes capturadas desde diferentes ángulos [4].

Un ejemplo de la aplicación del método SfM es la digitalización de sitios patrimoniales en la región de Reggio Calabria, al sur de Italia [5]. En el ámbito regional, se han registrado aportes a la reconstrucción tridimensional de bienes culturales combinando la segmentación de imágenes y el algoritmo SfM mediante librerías de código abierto [6]. Por su parte, investigaciones enfocadas en piezas de menor escala exploran el uso de sensores RGB-D para la captura de información espacial mediante diversos métodos [7].

En este contexto, otros trabajos han integrado procesos de fotogrametría y SfM empleando librerías especializadas como OpenMVG (*Open Multiple View Geometry*) [8, 9].

Paralelamente, la generación de modelos digitales 3D a partir de imágenes ha cobrado un interés creciente en las áreas de procesamiento de imágenes y fotogrametría [10]. En los últimos años, el avance notable de la tecnología de drones comerciales ha permitido el desarrollo de dispositivos capaces de grabar video de alta calidad [11]. A la par, han surgido herramientas de software como Pix4Dmapper, DroneDeploy, OpenDroneMap y Agisoft Metashape, diseñadas para la generación de nubes de puntos. Frente a los métodos tradicionales de conservación —como la representación gráfica manual o la evaluación directa *in situ*—, la reconstrucción 3D ofrece ventajas significativas en términos de eficiencia, precisión, fidelidad espacial, renderizado fotorrealista y capacidad de simulación [12].

En el análisis de estructuras, las fotografías capturadas por drones, combinadas con visión por computador y aprendizaje profundo (*deep learning*), facilitan la detección de daños superficiales o estructurales. No obstante, las imágenes aisladas u obtenidas de forma fragmentada suelen carecer del contexto espacial necesario para evaluar de manera integral una edificación. Asimismo, la identificación de un daño en una toma individual no permite cuantificar el deterioro global sin una georreferenciación o localización precisa. Ante esta limitación, la reconstrucción 3D surge como una solución eficaz, al permitir la visualización contextualizada de los daños sobre el modelo tridimensional para su posterior análisis, cuantificación y planificación de las tareas de conservación [13].

Un ejemplo del impacto de estas tecnologías en la conservación del patrimonio es el trabajo de [14], en el que se aplicaron técnicas de fotogrametría aérea con drones para reconstruir y documentar el conjunto basilical del yacimiento romano de Complutum. En una línea similar, se han desarrollado sistemas automatizados que combinan softwares de reconstrucción 3D —como Agisoft Metashape— con algoritmos de segmentación, lo que optimiza los tiempos de procesamiento y mejora la accesibilidad a los modelos [11].

Por otra parte, las herramientas BIM (*Building Information Modeling*), como Autodesk Revit, han facilitado la integración de las nubes de puntos generadas mediante programas de reconstrucción 3D en los flujos de gestión de datos. La metodología BIM permite una administración e intercambio de información más ágil, lo que favorece intervenciones constructivas coordinadas y coherentes. En este sentido, Autodesk Revit ofrece un entorno unificado que articula arquitectura, instalaciones y estructuras, lo que posibilita el modelado 3D detallado de edificaciones, terrenos y diversos elementos constructivos [15].

En el contexto local, el Coliseo El Salitre destaca como un inmueble de valor patrimonial excepcional. Su declaración como Bien de Interés Cultural (BIC) con nivel de conservación integral (Nivel 1), formalizada mediante la Resolución 090 de 2023, exige su salvaguarda rigurosa, de acuerdo con el artículo 20 del Decreto 763 de 2009.

Con capacidad para 5000 espectadores, este escenario se ha consolidado como un ícono del deporte bajo techo en la capital, al albergar competencias nacionales e internacionales en múltiples disciplinas. Por tanto, la gestión, operación y mantenimiento adecuados del coliseo resultan esenciales para promover la salud, el bienestar, el desarrollo comunitario, el turismo y la recreación en la ciudad. En este marco, resulta fundamental implementar herramientas como el modelado 3D para respaldar su conservación a largo plazo.

A pesar de que en Bogotá existen antecedentes sobre la conservación de monumentos patrimoniales mediante reconstrucción 3D —como los estudios aplicados a la escultura de La Rebeca o al busto de

Fabio Lozano Simonelli —, no se registra un trabajo enfocado específicamente en la estructura del Coliseo El Salitre [16, 17].

Por estas razones, la presente investigación tiene como objetivo principal desarrollar la reconstrucción tridimensional externa del Coliseo El Salitre a partir de fotogrametría aérea y la metodología BIM, con el propósito de identificar patologías visibles en la fachada y planificar futuras intervenciones de conservación. Este enfoque representa un aporte novedoso al aplicar tales tecnologías a un equipamiento deportivo de carácter patrimonial en el contexto colombiano, rellenando así un vacío documental en la preservación de esta tipología edificatoria.

1.1. Marco normativo para el vuelo de drones

La normativa aplicable a las aeronaves no tripuladas en Colombia se encuentra estipulada en el Reglamento Aeronáutico de Colombia (RAC 100), el cual clasifica estas aeronaves según su peso y propósito dentro del territorio nacional, además de establecer sanciones para quienes incumplan sus disposiciones. Entre los aspectos más relevantes de esta reglamentación que enmarcan este trabajo se destacan las siguientes condiciones para su uso:

- Los vuelos, ya sean diurnos o nocturnos, deben realizarse bajo las condiciones y reglas de operación aplicables según la categoría del equipo.
- La categoría abierta corresponde a las operaciones no comerciales (sin ánimo de lucro) que se realizan con una aeronave no tripulada, con un peso (masa) bruto máximo de operación de hasta 25 kilogramos.
- Está prohibido volar sobre áreas densamente pobladas, edificaciones o aglomeraciones de personas sin la autorización previa requerida.
- No se podrá volar a menos de 30 metros horizontales o verticales de cualquier edificación, sin que puedan superarse 400 pies (122 m) sobre el terreno y sólo se podrá operar para mantenerse dentro de la visibilidad en línea de vista (VLOS).
- No está permitido volar en zonas restringidas o prohibidas, como instalaciones militares, policiales o penitenciarias.
- Se prohíbe volar dentro de un radio de 2 km de cualquier lugar donde se encuentren el presidente, vicepresidente u otras autoridades nacionales o extranjeras.

La normativa mencionada fue revisada y aplicada rigurosamente en este trabajo. Dentro de los aspectos verificados, se determinó si el polígono de estudio se encontraba ubicado dentro de alguna zona protegida o restringida para el espacio aéreo.

2. Materiales y métodos

En esta sección se presentarán algunos de los equipos y herramientas utilizadas, así como la metodología utilizada en este trabajo.



Figura 1. Dron utilizado en el proyecto

Fuente: Autores.

2.1. Equipos utilizados

2.1.1. Dron

El UAV usado en el proyecto es el dron DJI MAVIC MINI (Figura 1), dron compacto y ligero con peso de 249 gramos y destacado por su cámara de alta calidad capaz de realizar tomas nítidas gracias a su estabilizador.

249 gramos

desplegado 159×202×55 mm (L×W×H)

máxima 3000 metros

máximo de vuelo: 30 minutos (por batería)

3 ejes (inclinación, giro, giro)

12 MP

de vídeo: 2.7K, FHD

Imagen: JPEG

Formato de video: MP4

2.1.2. Computador utilizado

La Tabla 1 muestra la información de la capacidad de la herramienta computacional utilizada para la reconstrucción del coliseo:

Tabla 1. Información del hardware y software del sistema

Sistema	
Nombre del software	Agisoft Metashape Professional
Versión del software	1.8.4 build 14654
OS	Windows 64 bit
RAM	15.21 GB
CPU	AMD Ryzen 9 7845HX with Radeon Graphics
GPU (s)	AMD Radeon (TM) 610M (gfx1036) NVIDIA GeForce RTX 4060 Laptop GPU

2.2. Metodología

Para cumplir los objetivos planteados en este proyecto, la metodología se estructuró en cinco fases. En primer lugar, se realiza la planificación y ejecución del vuelo para la captura de imágenes mediante un vehículo aéreo no tripulado (UAV), orientado a registrar en detalle la envolvente externa del escenario deportivo. En segundo lugar, se genera la nube de puntos tridimensional mediante el algoritmo de estructura a partir del movimiento (*Structure from Motion*, SfM), empleando herramientas de fotogrametría de código abierto para obtener dimensiones métricas como alturas y longitudes. En tercer lugar, se evalúa la calidad de la reconstrucción 3D mediante métricas cuantitativas que incluyen el error de reproyección y el cálculo de indicadores de precisión (MAE, MSE y RMSE), contrastando las dimensiones del modelo frente a mediciones de campo obtenidas con estación total. En cuarto lugar, se desarrolla el modelo BIM (*Building Information Modeling*) y se identifican las patologías o anomalías visibles en la edificación. Finalmente, se analizan las ventajas y limitaciones del flujo metodológico implementado. En la Figura 2 se esquematizan las distintas etapas de la reconstrucción tridimensional del Coliseo El Salitre a partir de las imágenes capturadas con el UAV.

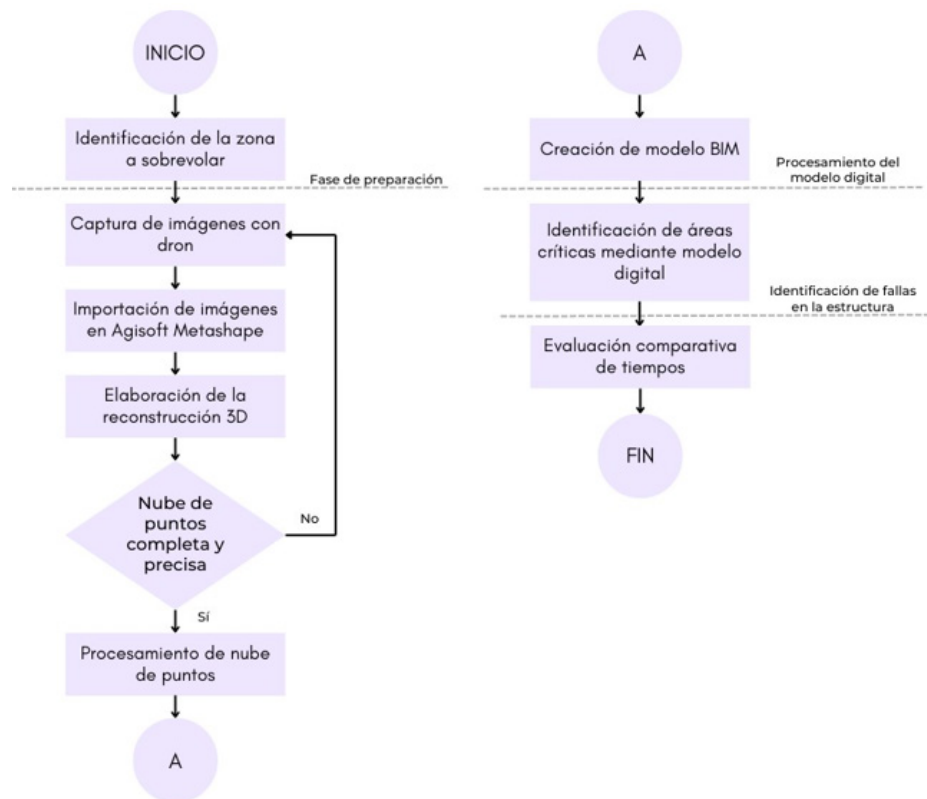


Figura 2. Proceso metodológico

Fuente: Autores.

2.2.1. Preparación del vuelo

Para realizar el levantamiento fotogramétrico de una edificación mediante el uso de aeronaves no tripuladas (UAV), es indispensable evaluar previamente las condiciones del entorno con el fin de cumplir con las disposiciones normativas y mitigar riesgos operacionales. Entre estos aspectos destacan la planificación rigurosa del plan de vuelo y el mapeo previo de obstáculos.

El plan de vuelo se diseñó considerando la geometría del Coliseo El Salitre y la presencia de elementos aislados en su entorno inmediato, principalmente luminarias de gran altura y masa arbórea. A fin de garantizar la seguridad de la operación y minimizar la ocurrencia de oclusiones en las imágenes, se fijó una altitud de vuelo superior a la cota máxima de dichos obstáculos. La ausencia de edificaciones colindantes de gran altura permitió establecer una geometría de adquisición homogénea, lo que facilitó la captura de fotogramas con alto porcentaje de solape (traslape longitudinal y transversal) y una cobertura integral de la estructura. Estas condiciones optimizaron la robustez del procesamiento fotogramétrico y la precisión métrica del modelo tridimensional. En la Figura 3 se ilustra la distribución espacial de las posiciones de toma (*camera stations*) registradas durante el vuelo.

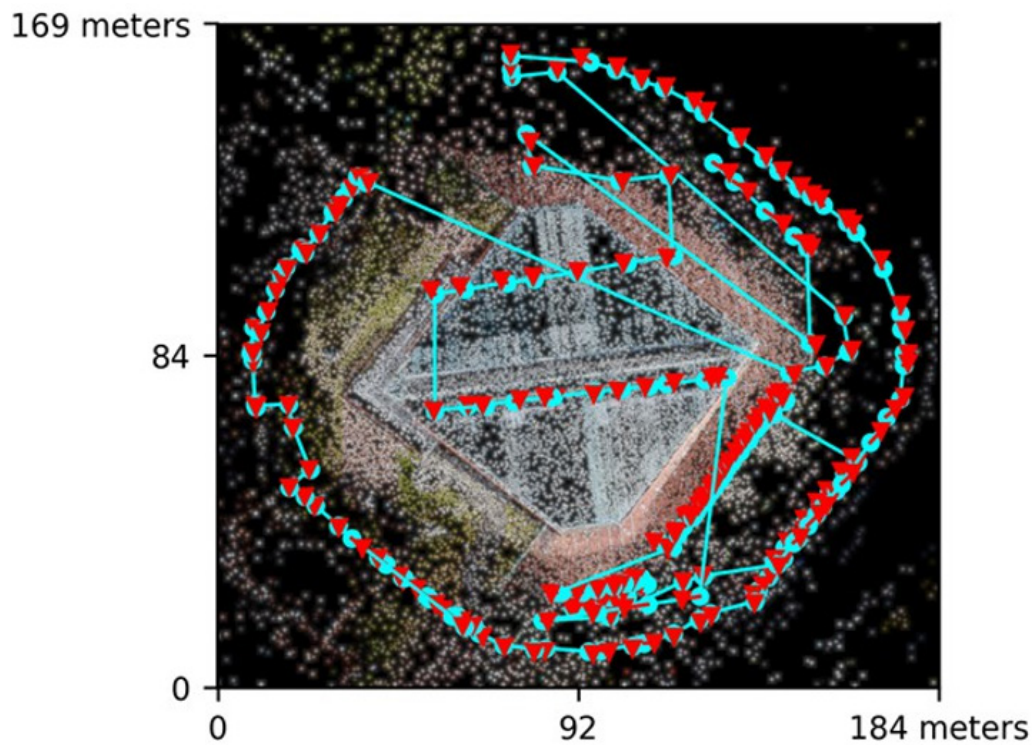


Figura 3. *Vuelo realizado*

Fuente: Autores.

Asimismo, las variables meteorológicas constituyen un factor crítico, toda vez que fenómenos como ráfagas de viento, precipitación o escasa visibilidad comprometen la estabilidad de la aeronave, deterioran la calidad radiométrica de las imágenes e incrementan el riesgo de incidentes. Del mismo modo, variaciones en la iluminación solar pueden alterar la consistencia semántica del levantamiento. Para mitigar estas fuentes de error, se consultaron los pronósticos meteorológicos locales y se programaron las operaciones en franjas matutinas, reduciendo la exposición a turbulencias eólicas e intensas sombras. La captura bajo estas condiciones garantizó un nivel de iluminancia uniforme, evitando sombras arrojadas y contrastes excesivos que dificultaran la correlación de puntos homólogos.

Finalmente, antes del despegue se realizó la prospección del polígono de estudio para identificar elementos de riesgo como postes, tendidos eléctricos y cobertura vegetal. En la Figura 4 se detallan los obstáculos identificados en la fase previa al vuelo. Mediante levantamiento topográfico con estación total, se determinó que la altura máxima de las estructuras de iluminación circundantes es de 18,77 m, valor tomado como cota de referencia para definir el plano de vuelo seguro.



Figura 4. *Obstáculos encontrados cerca al coliseo*

Fuente: Autores.

2.2.2. Captura de imágenes

En esta fase se capturaron imágenes de la envolvente del escenario deportivo mediante un vehículo aéreo no tripulado (UAV) DJI Mini 1, lo que permitió ejecutar tomas desde diferentes altitudes y ángulos de inclinación para optimizar la resolución espacial y el nivel de detalle.

El levantamiento aerofotogramétrico se inició con la ejecución de patrones de vuelo alrededor de la edificación. Se capturaron imágenes oblicuas comenzando desde cota baja e incrementando la altitud progresivamente, manteniendo la separación respecto a los obstáculos previamente identificados. Para garantizar una reconstrucción tridimensional consistente, se consideró un solapamiento (traslape) longitudinal y transversal recomendado de entre el 70 % y el 80 %, por lo que fue indispensable delimitar previamente el área de cobertura. El polígono levantado abarca una superficie aproximada de .16000 m²

La reconstrucción tridimensional se llevó a cabo a partir de un conjunto de 205 fotogramas aéreos. Las imágenes obtenidas fueron procesadas mediante los softwares Agisoft Metashape y OpenDrone-Map para la generación de la nube de puntos y el posterior modelado 3D.

2.2.3. Estructura desde el movimiento

Esta fase contempló la reconstrucción tridimensional a partir de las imágenes capturadas con el UAV, mediante el método de estructura a partir del movimiento (*Structure from Motion*, SfM). El procesamiento se realizó inicialmente con el software Agisoft Metashape, con el objetivo de generar una nube de puntos densa que sirviera como insumo para la construcción del modelo BIM en Autodesk Revit.

En las Figuras 5 y 6 se esquematizan las etapas principales para la obtención de la nube de puntos 3D mediante Agisoft Metashape. El flujo de trabajo abarca desde la importación de las imágenes hasta la alineación y generación de las nubes de puntos dispersa y densa. El proceso inicia con la carga de las

fotografías aéreas del Coliseo El Salitre en la plataforma; posteriormente, el software detecta puntos característicos (*features*) en las imágenes y ejecuta la orientación relativa mediante la correspondencia de puntos homólogos. Esto permite computar la nube de puntos dispersa, calibrar las posiciones y orientaciones de las cámaras (*camera alignment*) y, finalmente, derivar una malla poligonal 3D fotorrealista útil para la inspección visual e identificación de patologías en la estructura.

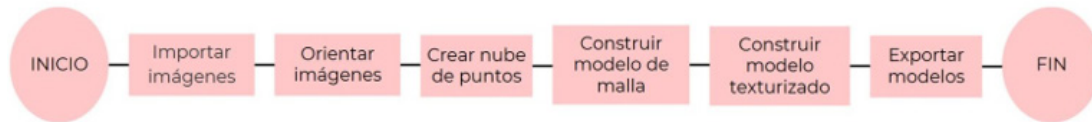


Figura 5. Flujo de trabajo estándar de un software de fotogrametría para la reconstrucción de modelos 3D.

Fuente: Autores.

La técnica SfM posibilitó la generación de productos fotogramétricos clave —tales como nubes de puntos y mallas poligonales— que proporcionan información geométrica detallada sobre la envolvente del escenario, facilitando la toma de decisiones respecto a eventuales intervenciones de mantenimiento o restauración.

De manera complementaria a la solución comercial de Agisoft, se realizó un procesamiento alternativo utilizando WebODM, la interfaz web de OpenDroneMap (ODM). Esta plataforma de código abierto permite procesar imágenes de UAV para generar nubes de puntos, modelos 3D y ortomosaicos. El entorno de trabajo se desplegó sobre un sistema operativo Ubuntu 22.04 mediante contenedores Docker. El flujo de procesamiento implementado comprendió las siguientes etapas:



Figura 6. Esquema de procesamiento de imágenes con el software de fotogrametría.

Fuente: Autores.

1. Detección y emparejamiento de características.
2. Estimación de parámetros de cámara mediante SfM.
3. Generación de nube de puntos dispersa.
4. Reconstrucción de nube de puntos densa.
5. Generación de malla y texturizado.
6. Georreferenciación utilizando coordenadas GPS embebidas en las imágenes.

2.2.4. Construcción de modelo BIM

El proceso *Scan-to-BIM* se estructuró en cuatro etapas principales: (i) adquisición fotogramétrica mediante UAV, (ii) generación de la nube de puntos densa georreferenciada, (iii) importación de la nube de puntos en el entorno CAD/BIM y (iv) modelado paramétrico de los componentes arquitectónicos representativos.

Durante esta última fase se ejecutaron operaciones de ajuste y ajuste geométrico sobre la nube de puntos para definir elementos volumétricos principales como cubiertas, muros y apoyos estructurales. Estos elementos se representaron mediante familias y objetos BIM paramétricos simplificados con un Nivel de Desarrollo LOD 200 (*Level of Development*). Se adoptó este nivel debido a que el objetivo central del estudio fue documentar la volumetría general del inmueble y generar una representación digital orientada a la preservación patrimonial, sin abarcar un diagnóstico constructivo de detalle ni la gestión operativa de mantenimiento. El nivel LOD 200 permite caracterizar con precisión la configuración espacial y la envoltura arquitectónica del bien cultural. Posterior al modelado, se realizó la identificación y georreferenciación de las anomalías o patologías visibles detectadas en las imágenes aéreas sobre el modelo tridimensional.

3. Resultados

En esta sección se presentan los resultados del proceso de reconstrucción tridimensional. En primer lugar, se exhiben las nubes de puntos generadas mediante las herramientas fotogramétricas evaluadas, seguidas de su correspondiente validación métrica y cuantitativa. A continuación, se detallan las zonas críticas y patologías identificadas en la envoltura del inmueble que requieren atención prioritaria. Finalmente, se expone el modelo paramétrico CAD/BIM desarrollado y se realiza una estimación comparativa de los beneficios operativos del flujo de trabajo UAV-BIM en relación con las metodologías tradicionales.

3.1. Reconstrucción 3D en Agisoft

Para realizar la reconstrucción tridimensional se siguió el flujo de trabajo propuesto. El software Agisoft Metashape facilita la generación de modelos texturizados que optimizan la visualización de la estructura. Estos modelos se derivan de la triangulación de la nube de puntos, razón por la cual es indispensable completar previamente la fase de densificación. Las mallas resultantes permiten una gestión más eficiente de la información, lo que acelera y precisa la identificación de vulnerabilidades o deterioros sobre un entorno digital unificado. Esta capacidad constituye una de las principales ventajas del levantamiento aerofotogramétrico mediante UAV, al optimizar las etapas de inspección y evaluación de la envolvente. Como productos principales del proceso fotogramétrico se obtuvieron la nube de puntos densa y el modelo texturizado.

La nube de puntos densa (ver Figura 7) se generó ajustando el parámetro de densidad en nivel alto y aplicando un filtrado de profundidad agresivo. Este procedimiento arrojó un total de 39 741 180 puntos, con un tiempo de cómputo de 23 minutos y 9 segundos, un consumo de memoria de 6,48 GB y un tamaño de archivo resultante de 584,54 MB.



Figura 7. Nube de puntos densa del coliseo El Salitre.

Fuente: Autores.

Por su parte, el modelo 3D texturizado (ver Figura 8) requirió un tiempo de procesamiento total de 18 minutos, un consumo de memoria de 7,33 GB y generó un archivo con un tamaño final de 313,45 MB.

3.2. Reconstrucción 3D en ODM

Para obtener resultados más accesibles se realizó una evaluación del proceso de reconstrucción mediante el software abierto OpenDroneMap.



Figura 8. *Modelo texturizado del coliseo El Salitre.*

Fuente: Autores.

3.2.1. Indicadores generales de reconstrucción

En las Tablas 2, 3, 4, 5 y 6 se presentan los indicadores generales de reconstrucción del coliseo.

Tabla 2. *Estadísticas generales de reconstrucción*

Parámetro	Valor
Imágenes reconstruidas	205/205 (100 %)
Puntos dispersos reconstruidos	155988
Puntos dispersos detectados	183544
Porcentaje de puntos reconstruidos	85.00%
Puntos de nube densa	1.5E+07
GSD promedio	0.8 cm/pixel
Características detectadas	6066
Características reconstruidas	2737
Referencia geográfica	GPS
Error GPS total	1.41 m

3.2.2. Calidad del ajuste fotogramétrico

Tabla 3. *Error promedio de reproyección*

Métrica	Valor
Error normalizado	0.13
Error en píxeles	0.76 px Error
angular	0.00022 rad

Los resultados muestran un error promedio de reproyección de 0.76 píxeles, valor considerado adecuado para aplicaciones fotogramétricas basadas en UAV de consumo.

3.2.3. Longitud de seguimiento de características

La longitud promedio de los tracks indica que las características fueron observadas en múltiples imágenes, favoreciendo la estabilidad geométrica de la reconstrucción.

Tabla 4. Longitud promedio de tracks

Métrica	Valor
Average Track Length	3.90 imágenes
Average Track Length (>2)	5.28 imágenes

3.2.4. Errores GPS

Tabla 5. Errores GPS reportados por ODM

Componente	Media (m)	Desv. Est. (m)	RMS (m)
X	0.000	1.299	1.299
Y	0.000	0.901	0.901
Z	0.000	0.670	0.670
Total		1.410	

3.2.5. Errores geométricos 3D

Gracias al uso de la herramienta ODM se obtuvo una estimación de los errores geométricos, los cuales se consignaron en la Tabla 6. Dado que estos errores indican valores altos, se planteó realizar una medición con una estación total para evaluar de manera más tangible las medidas del modelo.

Tabla 6. Errores geométricos 3D

Componente	Media (m)	Desv. Est. (m)	RMS (m)
X	0.331	3.016	3.034
Y	0.175	0.889	0.906
Z	0.823	10.431	10.463
Total		1.052	

3.2.6. Comparación con mediciones de estación total

Para obtener valores de referencia precisos de las alturas y dimensiones lineales de la edificación (ver Figura 9), se utilizó una estación total Topcon ES-105 (ver Figura 10). Estas mediciones de campo se compararon con las magnitudes extraídas del modelo 3D, cuyos resultados se sintetizan en la Tabla 7.

La validación métrica se llevó a cabo mediante siete mediciones independientes tomadas con la estación total. Si bien este conjunto de datos permitió estimar el error geométrico global del modelo, investigaciones futuras deberían incorporar una mayor densidad de puntos de control sobre el terreno (GCP, por sus siglas en inglés) distribuidos espacialmente en la envolvente del inmueble, con el fin de obtener una caracterización estadística más robusta.

El procesamiento fotogramétrico logró alinear e incorporar el 100 % de las imágenes aéreas capturadas, lo que evidencia una superposición adecuada entre fotogramas y una correcta detección y correspondencia de puntos característicos. La comparación entre las distancias reales medidas en campo y las calculadas sobre la nube de puntos arrojó un error absoluto medio (MAE) de 0,203 m (20,3 cm), un error cuadrático medio (RMSE) de 0,246 m (24,6 cm) y una desviación estándar de 0,15 m (15,0 cm).

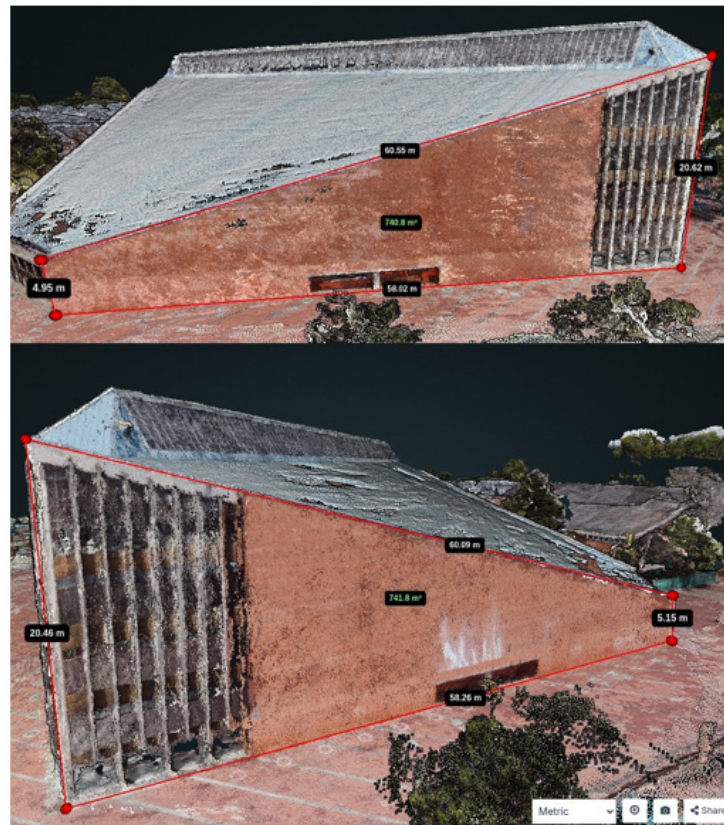


Figura 9. Medidas obtenidas usando ODM de las fachadas oriental y norte.

Fuente: Autores.

El error de reproyección promedio de 0.76 píxeles indica una buena consistencia interna del modelo fotogramétrico [18]. Este resultado sugiere que el ajuste de cámaras realizado por OpenDroneMap fue exitoso y que la correspondencia entre puntos característicos fue adecuada.

La nube de puntos densa generada contiene aproximadamente 14.8 millones de puntos, permitiendo representar con elevado nivel de detalle la escena observada.

El GSD promedio de 0.8 cm/píxel indica una resolución espacial elevada, adecuada para aplicaciones de inspección visual y reconstrucción tridimensional detallada.

3.2.7. Identificación de patologías visibles y condiciones de deterioro

El análisis del modelo digital reveló diversas lesiones en la envolvente del inmueble, así como la presencia de obras inconclusas en la fachada posterior del coliseo que permanecen paralizadas desde 2019. Estas condiciones han afectado el desarrollo regular de las actividades deportivas y deterioran la percepción del valor patrimonial entre usuarios, deportistas y transeúntes. Esta situación reafirma la urgencia de ejecutar procesos de digitalización, conservación y restauración en equipamientos de alta relevancia para la ciudad (Figura 11).



Figura 10. Validación con estación total.

Fuente: Autores.

Asimismo, la paralización de dichas intervenciones obligó a la instalación de polisombras o telas de cerramiento perimetral, lo que genera una falsa impresión de restricción total en el acceso al escenario. En la patología edilicia, la vulnerabilidad de una edificación se manifiesta mediante lesiones que se clasifican según su origen, el grado de severidad y la extensión del área afectada, abarcando desde deterioros estéticos o superficiales hasta daños estructurales severos que podrían comprometer la estabilidad global o parcial del inmueble.

En el Coliseo El Salitre se identificaron principalmente patologías asociadas a manchas de humedad y eflorescencias en muros de mampostería. Estas manifestaciones son causadas por la migración y acumulación de agua, la cual transporta sales solubles que cristalizan en la superficie al evaporarse, generando depósitos salinos de color blanco. Para su mitigación se requiere la corrección de las filtraciones de origen, la limpieza química de la zona afectada y la aplicación de sistemas impermeabilizantes.

Adicionalmente, se detectaron fisuras de trazado vertical, originadas comúnmente por asentamientos diferenciales del terreno, fenómenos de dilatación y contracción térmica o insuficiencia en el refuerzo estructural.

Si bien las imágenes aéreas capturadas por el UAV permitieron detectar indicios de deterioro, las tomas fragmentadas por sí solas carecen del contexto espacial necesario para evaluar de forma integral la estructura. La identificación de un daño en un fotograma aislado impide cuantificar adecuadamente el estado general de la edificación sin una georreferenciación precisa del hallazgo. En este sentido, la reconstrucción tridimensional constituye una herramienta eficaz para geolocalizar, cuantificar y visualizar las patologías directamente sobre el modelo digital de la envolvente.

A partir del modelo tridimensional generado, fue posible diagnosticar el estado actual de la estructura y mapear las lesiones visibles. De este modo, la implementación del flujo de digitalización contribuye a consolidar los conceptos de patrimonio virtual y humanidades digitales en el contexto local, sirviendo como insumo documental para futuras intervenciones de conservación.

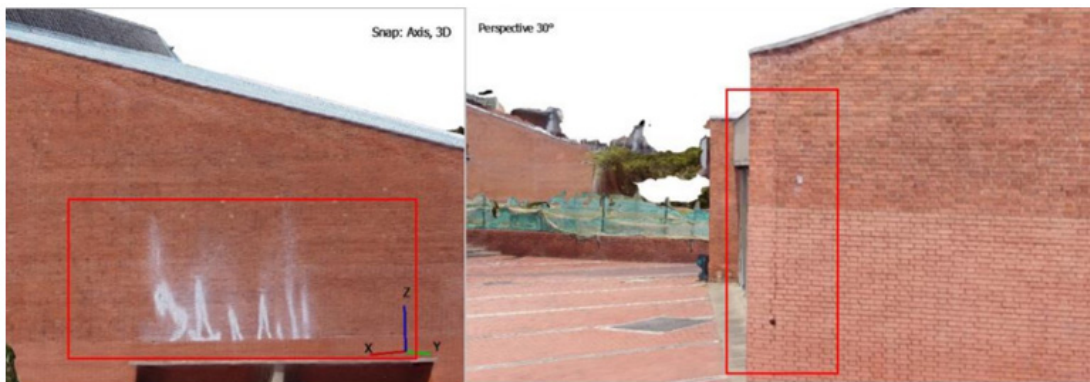


Figura 11. *Identificación de patologías en el coliseo El Salitre.*

Fuente: Autores.

Tabla 7. Comparación entre mediciones obtenidas mediante estación total y el modelo generado con OpenDroneMap

Estación Total (m)	ODM (m)	Diferencia (m)	Error Cuadrático (m ²)
58.44	58.02	0.42	0.1764
5.05	4.95	0.10	0.0100
20.99	20.62	0.37	0.1369
15.36	15.27	0.09	0.0081
58.54	58.26	0.28	0.0784
5.23	5.15	0.08	0.0064
15.30	15.22	0.08	0.0064
Error absoluto medio (MAE)			0.2028
Error cuadrático medio (MSE)			0.0604
Raíz del error cuadrático medio (RMSE)			0.2457

3.2.8. Creación de modelo BIM

Gracias a la interoperabilidad entre las soluciones de Autodesk, la nube de puntos densa generada en la fase fotogramétrica se exportó en formato estándar LAS (*LiDAR Data Exchange Format*). Posteriormente, este archivo fue procesado e indexado mediante Autodesk ReCap Pro para convertirlo al formato de proyecto RCP (*ReCap Project*), optimizado para su integración directa en flujos de trabajo BIM. Finalmente, el archivo RCP se vinculó como plantilla espacial en Autodesk Revit, lo que permitió interpretar la nube de puntos y modelar paramétricamente la envolvente tridimensional del Coliseo El Salitre.

Para la estructuración del modelo BIM, se definieron inicialmente las entidades arquitectónicas principales. En el entorno de Revit, se crearon y parametrizaron las familias de muros, configurando sus componentes de capa, materiales y espesores. Tomando como referencia la vista de la planta del Nivel 1 y la nube de puntos 3D, se insertaron los cerramientos verticales correspondientes (ver Figura 12). Posteriormente, desde las elevaciones Norte, Sur, Este y Oeste, se ajustaron las alturas, longitudes y vanos de los muros, ejecutando particiones específicas para la integración de los sistemas de muro cortina (ver Figura 13).

Una vez acoplada la estructura vertical de muros, se procedió al modelado de la cubierta (ver Figura 14), ajustando sus puntos de control topológicos para alinear sus pendientes y aristas con la geometría real extraída de la nube de puntos. Las carpinterías de puertas y ventanas se incorporaron mediante la carga de familias paramétricas de la biblioteca de Autodesk, posicionándolas sobre las aperturas previamente identificadas en la representación tridimensional (ver Figura 15). Desde la paleta de propiedades se asignaron las cotas de desfase e antepecho con respecto al Nivel 1 para garantizar su correcta altimetría. Finalmente, se generaron los renderizados de las vistas axonométricas y planos arquitectónicos, aplicando mapas de texturas y materiales que aportan fidelidad gráfica al modelo tridimensional (ver Figuras 16, 17 y 18).



Figura 12. *Proceso para insertar un muro en Revit*

Fuente: Autores.

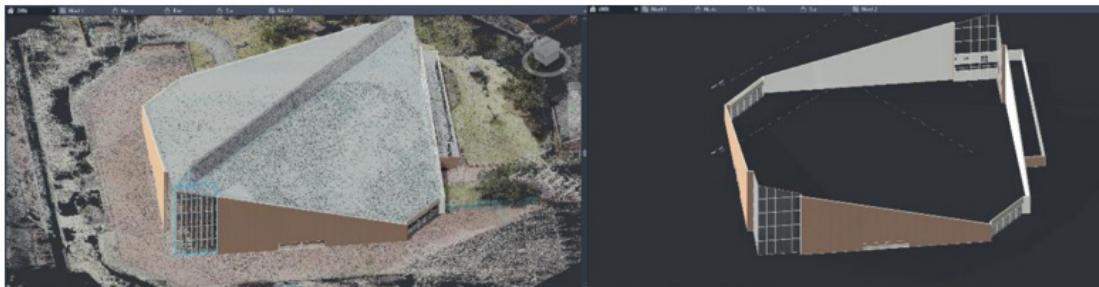


Figura 13. *Edición de los muros del coliseo*

Fuente: Autores.

3.2.9. Estimación de beneficios operativos del flujo UAV-BIM

La documentación geométrica del Coliseo El Salitre se realizó mediante un flujo de trabajo integrado por vehículos aéreos no tripulados (UAV), reconstrucción fotogramétrica y modelado BIM. Aunque en este estudio no se ejecutó de forma paralela un levantamiento convencional basado únicamente en métodos manuales, los tiempos registrados permiten identificar claras ventajas operativas asociadas al empleo de tecnologías digitales en la documentación del patrimonio.

En la Tabla 8 se resumen las principales actividades desarrolladas durante el proyecto con sus respectivos tiempos de ejecución. Por su parte, en la Tabla 9 se expone una evaluación cualitativa que compara el flujo propuesto frente a los métodos tradicionales de documentación arquitectónica.

El principal beneficio observado radica en la reducción significativa del trabajo de campo: la captura fotogramétrica aérea permitió adquirir la información geométrica detallada de la totalidad de la envolvente exterior del inmueble en una sola jornada de adquisición. Asimismo, la nube de puntos generada proporcionó una representación tridimensional continua, lo que facilitó la construcción del modelo BIM y minimizó la necesidad de realizar mediciones manuales complementarias o reiterativas durante la fase de gabinete.

Los resultados obtenidos evidencian que la integración de fotogrametría con UAV y modelado BIM constituye una alternativa eficiente para la documentación de bienes culturales. Si bien no se realizó un contraste experimental directo con métodos tradicionales, la metodología aplicada permitió optimizar las campañas de captura en campo y consolidar una representación tridimensional integral. En este sentido, el modelo BIM alcanzado constituye una valiosa aproximación a la preservación digital del patrimonio, susceptible de ser enriquecida en investigaciones futuras mediante la incorporación de información semántica y niveles de desarrollo superiores (*Level of Development*), propios de los entornos HBIM (*Heritage Building Information Modeling*).

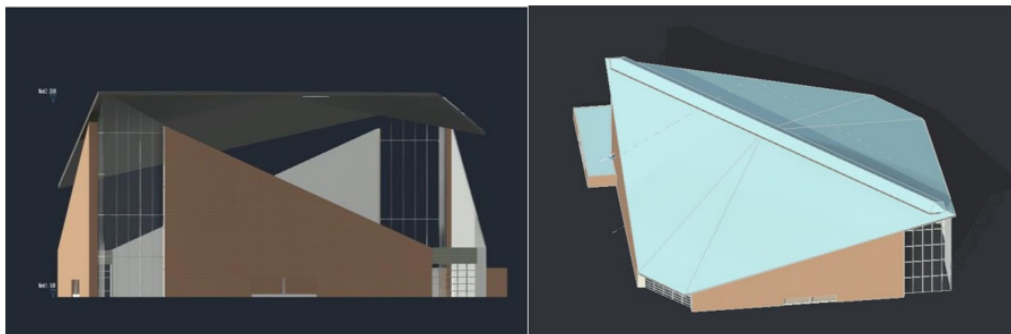


Figura 14. Representación de los muros y ventanas

Fuente: Autores.



Figura 15. Vista del modelo BIM del coliseo

Fuente: Autores.

4. Conclusiones

Los resultados obtenidos demuestran que el uso de plataformas UAV de bajo costo, combinadas con software de código abierto para reconstrucción fotogramétrica, permite generar modelos tridimensionales de la envolvente de edificaciones emblemáticas como el Coliseo El Salitre, como paso previo a la estructuración de modelos CAD/BIM representativos. La validación geométrica contra mediciones independientes de estación total arrojó un error cuadrático medio (RMSE) de 0,246 m y un error absoluto medio (MAE) de 0,203 m, lo que proporciona una referencia métrica objetiva sobre la precisión alcanzada por la reconstrucción.

El proceso de digitalización del escenario deportivo, basado en imágenes de alta resolución capturadas desde múltiples ángulos y altitudes, permitió generar el modelo 3D del inmueble y caracterizar las patologías presentes en la mampostería de fachada. Específicamente, se identificaron e infraestructuras con grietas y eflorescencias causadas por la migración de humedad.

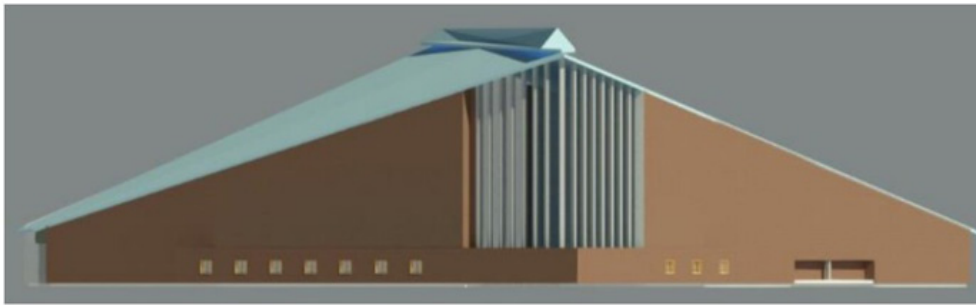


Figura 16. Vista frontal del coliseo del modelo BIM

Fuente: Autores.

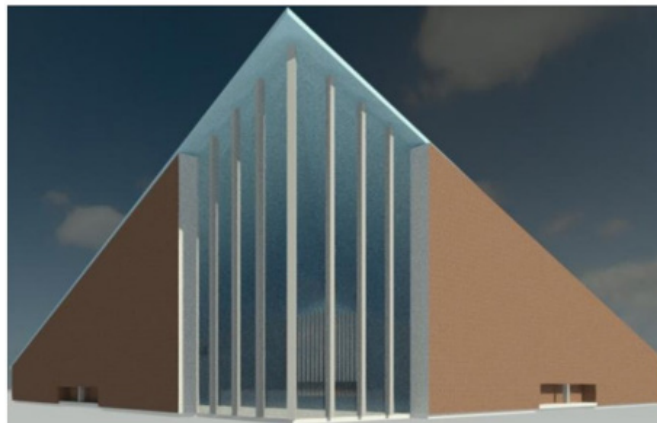


Figura 17. Vista frontal del coliseo del modelo BIM

Fuente: Autores.

El flujo de trabajo implementado en el entorno BIM facilitó la transformación de la nube de puntos en representaciones paramétricas e imágenes de alta definición para el análisis geométrico y compositivo de la estructura. El modelo se desarrolló bajo un Nivel de Desarrollo LOD 200, el cual define las dimensiones, proporciones y formas generales de los elementos representativos —como muros de mampostería, vanos de ventanas y la geometría de la cubierta— sin incursionar en detalles constructivos complejos.

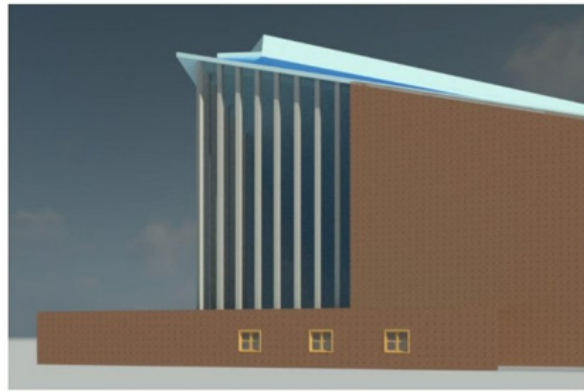


Figura 18. *Vista costado derecho del coliseo del modelo BIM*

Fuente: Autores.

Esta representación digital constituye una herramienta de soporte para la documentación, gestión de mantenimiento e intervenciones futuras en el inmueble, además de servir como marco de referencia para el levantamiento de tipologías arquitectónicas similares. Asimismo, los hallazgos sugieren que el flujo integrado UAV-fotogrametría-BIM optimiza significativamente los tiempos de captura en campo frente a los enfoques convencionales basados en mediciones manuales extensivas.

En conclusión, la metodología aplicada demuestra que la reconstrucción 3D y el modelado BIM permiten preservar digitalmente la geometría exterior de bienes de valor patrimonial como el Coliseo El Salitre, consolidando un repositorio de información útil para su futura inspección, conservación y salvaguarda.

4.1 Trabajo futuro

Esta investigación sienta las bases para transferir la metodología propuesta a otras edificaciones históricas o de alto valor patrimonial. La incorporación de técnicas de captura tridimensional de mayor precisión —como los sistemas de posicionamiento cinemático en tiempo real (RTK) o sensores LiDAR— junto con niveles de desarrollo BIM avanzados, puede extenderse a diversos casos de estudio del ámbito local e internacional, proporcionando una herramienta integral para la conservación y restauración del patrimonio construido.

Tabla 8. Actividades desarrolladas durante la reconstrucción tridimensional del Coliseo El Salitre

Actividad	Tiempo aproximado
Planificación del levantamiento fotogramétrico	4 horas
Captura de imágenes mediante UAV	1 día
Procesamiento fotogramétrico y generación de nube de puntos	2 días
Validación geométrica mediante estación total	1 día
Modelado BIM LOD 200 a partir de la nube de puntos	2 semanas
Verificación y ajustes finales del modelo	2 días
Tiempo total aproximado	3 semanas

En lo relativo a la evolución del modelo digital, los trabajos futuros podrán centrarse en el incremento progresivo del Nivel de Desarrollo (*Level of Development*, LOD). La estructuración en LOD 200 adoptada en este estudio constituye una fase inicial orientada a la caracterización volumétrica del activo, sirviendo como base para su posterior migración hacia esquemas de modelado de información del patrimonio histórico (*Heritage Building Information Modeling*, HBIM). A partir de este hito, se plantea avanzar hacia niveles de definición superiores (LOD 300 o LOD 400), con el propósito de optimizar la planificación, el diagnóstico patológico de detalle y la ejecución de intervenciones constructivas sobre la envolvente y la estructura del Coliseo El Salitre. Asimismo, la definición formal de acciones correctivas específicas deberá complementarse con inspecciones físicas in situ por parte de especialistas, así como con la futura prospección y levantamiento fotogramétrico de los espacios interiores del escenario.

Finalmente, como línea de investigación emergente, se propone la integración de algoritmos de inteligencia artificial (IA) y visión por computador. A medida que se consoliden bases de datos fotogramétricas de bienes culturales, el entrenamiento de modelos de aprendizaje profundo (*deep learning*) permitirá la detección y segmentación automatizada de patologías visibles —tales como fisuras, eflorescencias y desprendimientos— directamente sobre las imágenes capturadas por los UAV o sobre la nube de puntos tridimensional.

Tabla 9. Comparación cualitativa entre metodologías de documentación arquitectónica

Aspecto	Levantamiento convencional	Flujo UAV-Fotogrametría-BIM
Cobertura geométrica	Parcial y dependiente del acceso físico	Cobertura completa de fachadas y cubierta
Trabajo de campo	Elevado	Reducido
Captura de documentación fotográfica	Actividad independiente	Integrada al vuelo fotogramétrico
Seguridad operacional	Exposición directa a zonas de difícil acceso	Menor exposición del personal
Registro permanente de la geometría	Limitado	Nube de puntos tridimensional georreferenciada
Actualización futura del modelo	Requiere nuevas campañas de medición	Puede realizarse a partir de nuevos vuelos
Integración BIM	Generalmente manual	Compatible con flujos Scan-to-BIM

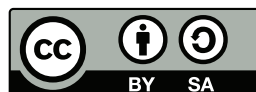
5. Agradecimientos

Este trabajo fue desarrollado como parte del proyecto de investigación científica INV_ING_3785 financiado por Vicerrectoría de Investigaciones. Los autores agradecen a los profesores Felipe Riaño, Luz Piedad Gallego Osorio y Zully Alexandra Palomeque Sánchez del Programa de Ingeniería Civil de la UMNG por sus recomendaciones para la finalización de este trabajo.

Referencias

- [1] P. Müller, G. Zeng, P. Wonka, and L. Van Gool, "Image-based procedural modeling of facades," *ACM Trans. Graph.*, vol. 26, no. 3, pp. 85–es, Jul. 2007. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1145/1276377.1276484>
- [2] J. Xiao, T. Fang, P. Zhao, M. Lhuillier, and L. Quan, "Image-based street-side city modeling," *ACM Trans. Graph.*, vol. 28, no. 5, pp. 1–12, Dec. 2009. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1145/1618452.1618460>
- [3] E. Orthuber and J. Avbelj, "3D building reconstruction from LiDAR point clouds by adaptive dual contouring," *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. II-3/W4, pp. 157–164, Mar. 2015, in *PIA15+HRIGI15 – Joint ISPRS Conference (Volume II-3/W4)*, 25–27 March 2015, Munich, Germany. [Online]. Available: <https://isprs-annals.copernicus.org/articles/II-3-W4/157/2015/>
- [4] Y. Furukawa and J. Ponce, "Accurate, dense, and robust multiview stereopsis," *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 32, no. 8, pp. 1362–1376, 2010. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/TPAMI.2009.161>
- [5] V. Barrile, V. Gelsomino, and G. Bilotta, "UAV and computer vision in 3D modeling of cultural heritage in southern Italy," *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 225, no. 1, p. 012196, Aug. 2017. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/225/1/012196>

- [6] L. E. Melo and A. Cerón, "3D reconstruction of archaeological contexts using image segmentation and structure from motion," in *2021 XXIII Symposium on Image, Signal Processing and Artificial Vision (STSIVA)*, Sep. 2021, pp. 1–6. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/STSIVA53688.2021.9592001>
- [7] J. M. R. Troncoso and A. Cerón, "3D reconstruction of cultural heritage pieces using depth sensors," in *2024 XXIV Symposium of Image, Signal Processing, and Artificial Vision (STSIVA)*, Jul. 2024, pp. 1–5. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/STSIVA63281.2024.10637858>
- [8] A. Pamart, F. Morlet, L. De Luca, and P. Veron, "A robust and versatile pipeline for automatic photogrammetric-based registration of multimodal cultural heritage documentation," *Remote Sensing*, vol. 12, no. 12, p. 2051, Jun. 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/rs12122051>
- [9] P. Moulon, P. Monasse, R. Perrot, and R. Marlet, "OpenMVG: Open multiple view geometry," in *International Workshop on Reproducible Research in Pattern Recognition*, Springer, 2016, pp. 60–74. [Online]. Available: https://doi.org/10.1007/978-3-319-56414-2_5
- [10] A. Alouache, X. Yao, and Q. Wu, "Creating textured 3D models from image collections using open source software," *International Journal of Computer Applications*, vol. 163, no. 9, pp. 14–19, Apr. 2017. [Online]. Available: <https://doi.org/10.5120/ijca2017913734>
- [11] I. A. Ramos Howell, "Desarrollo de un sistema de reconstrucción 3D a partir de imágenes capturadas por drones," bachelor thesis, Sep. 2019. [Online]. Available: <https://repositorio.uam.es/handle/10486/689090>
- [12] Y. Liu and J. Chen, "Research on the conservation of historical buildings based on digital 3D reconstruction," *Procedia Computer Science*, vol. 228, pp. 593–600, Jan. 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.procs.2023.11.068>
- [13] C. Zhang, F. Wang, Y. Zou, J. Dimyadi, B. H. W. Guo, and L. Hou, "Automated UAV image-to-BIM registration for building façade inspection using improved generalised Hough transform," *Automation in Construction*, vol. 153, p. 104957, Sep. 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2023.104957>
- [14] C. Pérez Palomino, "Complutum: reconstrucción 3D del foro del yacimiento romano de Alcalá de Henares," Jun. 2022. [Online]. Available: <https://oa.upm.es/70989/>
- [15] E. L. Carballo-Hernández, L. E. Acosta-González, J. C. Fernández-García, and F. Ojeda-Pardo, "Modelado de edificaciones a partir de nubes de puntos con el uso de Autodesk Revit: e313," *Revista Cubana de Ingeniería*, vol. 12, no. 4, Sep. 2021. [Online]. Available: <https://rci.cujae.edu.cu/index.php/rci/article/view/813>
- [16] A. Páez-Cuervo, J. D. G. Hernández, and E. S. Upegui, "Fotogrametría SfM como herramienta para la preservación del patrimonio cultural de Bogotá (Colombia): caso de estudio La Rebeca," *UD y la Geomática*, no. 15, 2020.
- [17] L. D. Rodríguez Buitrago, L. D. Pachón Acuña, and E. S. Upegui Cardona, "Virtualización del patrimonio como oportunidad para el turismo: comparación entre software comercial y software libre para la reconstrucción 3D. Estudio de caso Busto Fabio Lozano Simonelli," *RISTI*, Jul. 2022. [Online]. Available: <http://hdl.handle.net/11349/29892>
- [18] T. Luhmann, S. Robson, S. Kyle, and I. Harley, *Close-Range Photogrammetry and 3D Imaging*. Berlin: Walter de Gruyter GmbH, 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1515/9783110607253>





Characterization and prediction of solar radiation in the municipality of Mompox-Bolívar using time series models

Caracterización y predicción de la radiación solar en el municipio de Mompox-Bolívar usando modelos de series de tiempo

Gabriel Elías Chanchí-Golondrino ¹, Manuel Alejandro Ospina-Alarcón ², Álvaro Realpe-Jiménez ³,

Fecha de Recepción: 30 de julio de 2025

Fecha de Aceptación: 31 de julio de 2026

Cómo citar: G. E. Chanchí-Golondrino, M. A. Ospina-Alarcón and A. Realpe-Jiménez, «Characterization and prediction of solar radiation in the municipality of Mompox-Bolívar using time series models», *Tecnura*, vol. 30, n.º 89, jul. 2026. 47–71.
<https://doi.org/10.14483/22487638.23971>

Abstract

Objective: Considering the growing transition towards renewable energies and specifically the solar potential of Colombia and the Caribbean region with respect to photovoltaic solar energy, as well as the need to develop solar potential characterization studies, in this article, the adjustment and evaluation of four stationary and seasonal time series models (ARIMA, SARIMA, SARIMAX, and Exponential Smoothing) on solar radiation data from the municipality of Mompox-Bolívar are proposed as a contribution.

Methodology: Methodologically, within this research, the CRISP-DM methodology was adapted into 4 phases, namely: F1. Business and data understanding, F2. Data preparation, F3. Modeling, F4. Model evaluation and deployment.

Results: As a result, it was obtained that at the level of stationary models, the ARIMA (3,0,3) model was the one that achieved the best fit, with a moderate coefficient of determination for the training and test sets. Likewise, with respect to models with a seasonal component, it was determined that the SARIMA model based on ARIMA (3,0,3) and with a seasonal component (1,0,1,8) had the best performance, with a good fit on the training set (R^2 of 0.8571) and test set (R^2 of 0.8152).

Conclusions: It is concluded that the incorporation of the exogenous variable into the SARIMA model did not improve the SARIMA model's performance, such that the SARIMAX model obtained good performance on the training set and moderate performance on the test set. Likewise, the models obtained in this research are of great utility for the characterization of solar radiation potential, as well as for efficient planning in the deployment of photovoltaic solar energy systems.

Keywords: ARIMA, solar energy, solar radiation, SARIMA, time series.

1 Ph.D en Ingeniería Telemática. Facultad de Ingeniería de la Universidad de Cartagena.  Email: gchanchig@unicartagena.edu.co

2 Ph.D en Ingeniería – Ciencia y Tecnología de Materiales. Facultad de Ingeniería de la Universidad de Cartagena.  Email: mospinaa@unicartagena.edu.co

3 Ph.D en Ingeniería Química. Facultad de Ingeniería de la Universidad de Cartagena.  Email: arealpe@unicartagena.edu.co

Resumen

Objetivo: Teniendo en cuenta la transición creciente hacia las energías renovables y específicamente el potencial solar de Colombia y de la región caribe con respecto a la energía solar fotovoltaica, así como la necesidad de desarrollar estudios de caracterización del potencial solar, en este artículo se propone como contribución el ajuste y evaluación de cuatro modelos de series de tiempo estacionarios y estacionales (ARIMA, SARIMA, SARIMAX y Exponential Smoothing) sobre los datos de radiación solar del municipio de Mompo-Bolívar.

Metodología: A nivel metodológico, dentro de esta investigación fue adaptada la metodología CRISP-DM a 4 fases a saber: F1. Entendimiento del negocio y de los datos, F2. Preparación de los datos, F3. Modelado, F4 Evaluación y Despliegue del modelo.

Resultados: Como resultado, se obtuvo que a nivel de los modelos estacionarios, el modelo ARIMA (3,0,3) fue el que obtuvo un mejor ajuste, con un coeficiente de determinación moderado para el conjunto de entrenamiento y prueba. Así mismo, con respecto a los modelos con componente estacional, se determinó que el modelo SARIMA basado en ARIMA(3,0,3) y con componente estacional (1,0,1,8) fue el que tuvo el mejor rendimiento, con un buen ajuste en el conjunto de entrenamiento (R^2 de 0.8571) y prueba (R^2 de 0.8152).

Conclusiones: Se concluye que la incorporación de la variable exógena al modelo SARIMA no mejoró el rendimiento del modelo SARIMA, de tal modo que el modelo SARIMAX obtuvo un buen rendimiento en el conjunto de entrenamiento y un rendimiento moderado en el conjunto de prueba. Así mismo, los modelos obtenidos en esta investigación, son de gran utilidad para la caracterización del potencial de la radiación solar, así como para la planificación eficiente en el despliegue de sistemas de energía solar fotovoltaica.

Palabras clave: ARIMA, energía solar, radiación solar, SARIMA, series de tiempo.

Introduction

Solar radiation is the radiant energy emitted by the Sun through visible light as a result of the nuclear fusion process, manifesting as electromagnetic waves with wavelengths between 0.30 μm and 3 μm , including photons in the visible spectrum [1]- [3]. Upon reaching the Earth's atmosphere, some of this radiation is attenuated and divided into direct and diffuse components, both of which are usable for electricity generation [4]. This component categorization is essential for understanding the availability of solar energy under different meteorological and geographical conditions [5]. Solar radiation is fundamental to life, climate, biological processes, and nuclear fusion processes on Earth, spanning wavelengths from ultraviolet to infrared and including chemicals, as well as regulating ecosystems [6], [7]. However, the continued use of fossil fuels generates CO_2 emissions that accelerate climate change, worsening global environmental challenges [8], [9]. Conventional oil and coal reserves could be depleted within the next century, making early adoption of renewable energy sources critical [9], [10].

As the foundation of all renewable energy technologies, solar radiation drives wind generation, water evaporation, and biomass growth [7], [11]. Photovoltaic panels and concentrated solar power (CSP) systems reliably convert sunlight into electricity or heat [7], [12]. Therefore, the use of solar radiation not only reduces dependence on fossil fuels but also significantly reduces greenhouse gas emissions [2],

[11]. In this regard, solar energy's technical potential far exceeds the global electricity consumption, making it a viable and scalable option for the future energy landscape [7].

Solar energy stands out as one of the most promising renewable sources compared to other alternatives. Its main advantage is its virtually inexhaustible nature and its worldwide availability, making it a viable option even in remote regions or those with limited access to other energy sources [13]-[15]. Off-grid photovoltaic systems represent the most cost-effective solution for basic electricity supply in regions without grid connection [16], [17]. In this regard, unlike fossil fuels, solar energy also has the advantage of not producing polluting emissions or greenhouse gases during its operation, helping to combat climate change and environmental pollution [18], [19]. Likewise, solar energy reduces dependence on imported energy resources, such as fossil fuels (oil, natural gas, coal), while decreasing vulnerability to price fluctuations and geopolitical risks, simultaneously promoting economic development and local job creation in manufacturing, installation, and maintenance of solar systems [13], [14].

The study and characterization of solar radiation is fundamental because it is an essential resource that enables the generation of electricity in PV systems. In this regard, an increase in the intensity of solar radiation significantly enhances the power and energy generated by PV panels. For example, when going from 1000 to 3000 W/m², electrical power can increase almost three times, and the total energy generated can increase by up to 179% [20], [21]. Thus, the variation in the duration and intensity of solar radiation according to the time of day affects both daily and annual energy production [22], [23]. According to IDEAM data, Mompo-Bolívar records average irradiance levels exceeding 5 kWh/m²-day, positioning it as a high solar potential [24]. Therefore, regions with high radiation levels can generate more electricity with the same infrastructure, thereby optimizing investment and reducing costs [23], [25]. Based on the above, evaluating and harnessing the maximum potential of solar radiation allows the optimization of the location, orientation, and operation of PV panels, thereby increasing the overall efficiency of the system [26].

Various state-of-the-art studies have been conducted on solar radiation and its characterization at different latitudes worldwide. Thus, in [27], [28], several studies were conducted in the Turkish provinces of Kırklareli, Tokat, Nevşehir, and Karaman, using algorithms such as artificial neural networks (ANN), support vector machines (SVM), k-NN, and deep learning to predict daily solar radiation with high accuracy. Similarly, in [29], empirical models and ML algorithms were compared to predict diffuse solar radiation at 17 meteorological stations in China, covering different climates and atmospheric conditions. Similarly, in [30], recurrent neural network (RNN) and ANN models were applied using meteorological data from Alabama, United States, with the result that RNN models provide higher prediction accuracy. Although these studies report high prediction accuracy, most of them rely on AI or ML approaches that require multiple meteorological variables, large training datasets, and high computational resources.

Consequently, their implementation may be difficult in regions where long-term historical information or multiple environmental variables are not readily available.

In Colombia, a study was conducted in [5] based on the descriptive statistics of radiation data from the city of Cúcuta, taking into account a 9-year history, aiming at the quantification and prediction of available solar resources. Similarly, in [31], the contribution of the so-called Solar Atlas of Colombia, an online tool that allows visualization of meteorological data and estimation of photovoltaic generation potential across the entire Colombian territory, was proposed, using satellite data validated with local measurements and regional climate models. Furthermore, in [32]-[34], algorithms such as ANFIS and regression models were used to predict solar radiation in specific areas, such as Cajicá and the Atlantic coast, achieving low prediction errors (below 1% in some cases). Similarly, in [35], statistical models, such as Markov chains and WRF, were used for characterization and short-term and hourly forecasting, especially in urban areas like Medellín, showing that these methods can be computationally efficient alternatives. In the same vein, in [36], a study was conducted in La Guajira, Colombia, using solar radiation meteorological data from IDEAM for more than five years, evaluated with the Bird and Hulstrom model, with the objective of quantifying and identifying areas with greater potential for solar technology development, considering geometric, geographic, astronomical, physical, and meteorological variables. Similarly, in [37], a statistical methodology was developed in Bogotá, Colombia, to characterize solar irradiance and ambient temperature, using real measurements from 6:00 a.m. to 6:00 p.m., with probability distribution function models and Monte Carlo simulations, to assess the performance of solar systems, such as photovoltaic and thermal systems. Although previous studies have compared statistical and ML approaches for solar radiation forecasting, their results strongly depend on the geographical location, temporal resolution, climatic conditions, input variables, and forecasting horizon [38], [39]. In the Colombian Caribbean, previous research has evaluated statistical and machine-learning models for solar radiation forecasting [35], [40]; however, the comparative performance of ARIMA, SARIMA, SARIMAX, and Exponential Smoothing models under a common evaluation framework has not been specifically examined for the municipality of Mompox-Bolívar. In addition, the effect of incorporating wind speed as an exogenous variable into statistical time-series models requires a local evaluation because the contribution of meteorological predictors may vary according to regional climatic conditions [39]. Therefore, this study addresses this location-specific methodological gap by comparing classical time-series models for solar radiation forecasting in Mompox-Bolívar.

To address the aforementioned research gaps, this study proposes the implementation, adjustment, and evaluation of various time series models for the characterization, analysis, and prediction of solar radiation in the municipality of Mompox-Bolívar, with the aim of identifying the feasibility and solar potential of this municipality for the deployment of renewable energy projects, specifically photovoltaic solar energy. Thus, using historical solar radiation data from the municipality of Mompox-Bolívar for the years 2021 and 2022, the adjustment and evaluation of the fitting capacity of four time series models

were performed: ARIMA, SARIMA (without exogenous variable), SARIMAX with the exogenous variable of wind speed, and finally the Exponential Smoothing model. The parameters providing the best fit were adjusted for each of the considered models, and the performance of these models was compared using error metrics (mean absolute error (MAE), root mean squared error (RMSE)) and the coefficient of determination (R^2). The main scientific contributions of this research are as follows: (i) a systematic comparative evaluation of four classical statistical time-series models for solar radiation forecasting, (ii) identification of the most suitable forecasting model for solar radiation in Mompox-Bolívar, (iii) evaluation of the contribution of wind speed as an exogenous variable in SARIMAX-based forecasting, and (iv) proposal of a reproducible forecasting methodology based on CRISP-DM and free and open-source software that can be readily adapted to other geographical regions.

The results obtained in this research are highly useful for photovoltaic energy providers and government entities because they allow for identifying the available energy potential in different months of the year and, crucially, for anticipating the availability of this resource in advance. Thus, the potential of the forecasts generated by the time series models lies in optimizing the operational and strategic planning of solar plants, improving grid management, minimizing risks associated with the intermittency of the source, and facilitating informed decision-making for investment and efficient deployment of photovoltaic infrastructure in the municipality of Mompox, providing a clear view of the viability of solar energy projects in the region and promoting sustainable development. Furthermore, given the use of free and open-source software (FOSS) technologies, universities and research centers can use this work to extrapolate the considered models in the characterization and prediction of solar radiation data in different latitudes.

The rest of the article is organized as follows: Section 2 outlines the various phases of the CRISP-DM methodology used in carrying out this research. Section 3 presents the results obtained in this study, which includes the identification of the parameters for the 4 models considered, associated with stationarity and seasonality, as well as the adjustment and evaluation of the different models, aimed at determining the parameters that provide the best fit in each case, considering the error metrics and the coefficient of determination (R^2). Finally, this phase includes forecast generation for each model. Lastly, Section 4 presents the conclusions and future work derived from this research.

Methodology

For the development of this research, an adaptation of the CRISP-DM methodology was made into four phases: P1. Business and data understanding, P2. Data preparation, P3. Modeling, P4. Evaluation and Deployment. This methodology was adapted considering that it constitutes a standardized process model, widely used in the development of data mining and machine learning projects, characterized by its independence from the industrial sector and the type of technology used, making it versatile and applicable to various contexts [41]-[44].

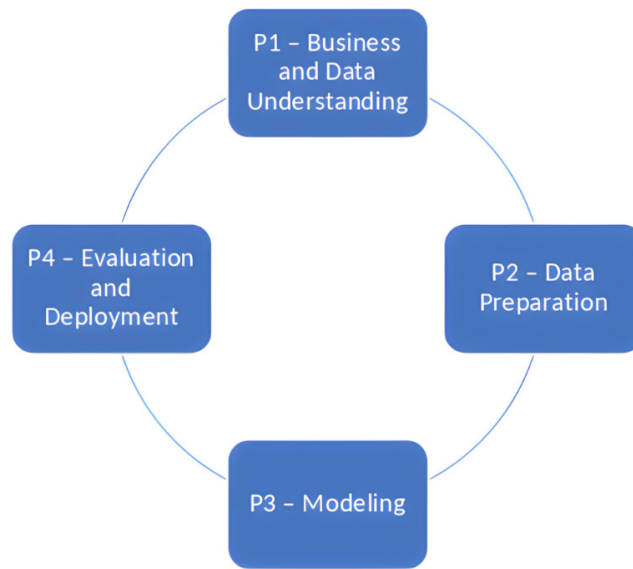


Figure 1. Adaptation of CRISP-DM

Source: Authors.

In phase 1 of the methodology, solar radiation data for the municipality of Mompox for the years 2021 and 2022 were obtained from the Institute of Hydrology, Meteorology, and Environmental Studies (IDEAM) portal, with data captured at an hourly frequency, resulting in a total dataset of 17,529 data points. Likewise, in this phase, the existence of possible missing values was identified, and a visual analysis of the weekly and monthly radiation for the Mompox municipality was conducted. Thus, Figure 2 presents a sample of the solar radiation time series, where one data point is shown for every 30 points to make the series less dense and facilitate the analysis of its general behavior. Based on the data in Figure 2, it is possible to identify that the time series exhibits variability, suggesting some stationarity around a constant mean over time. Additionally, a clear periodicity is observed, indicating a possible seasonal behavior, with peaks and valleys repeating in regular cycles, which will be verified by identifying the model parameters.

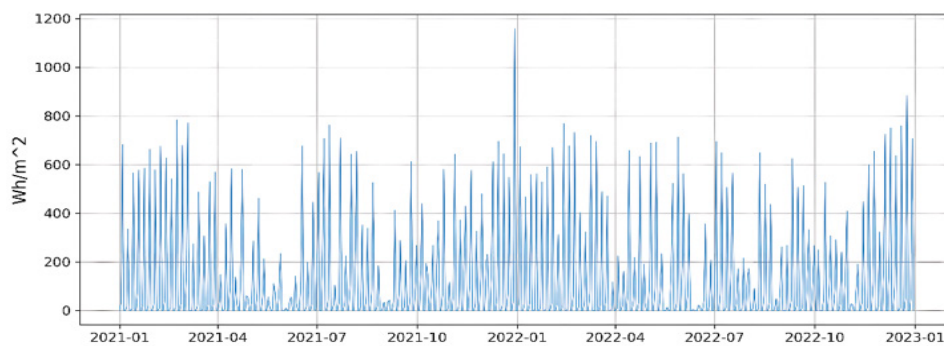


Figure 2. Solar radiation in the municipality of Mompox during the years 2021 and 2022

Source: Authors.

In line with Figure 2, Figure 3 presents the weekly average of solar radiation for the municipality of Mompox during 2021 and 2022.

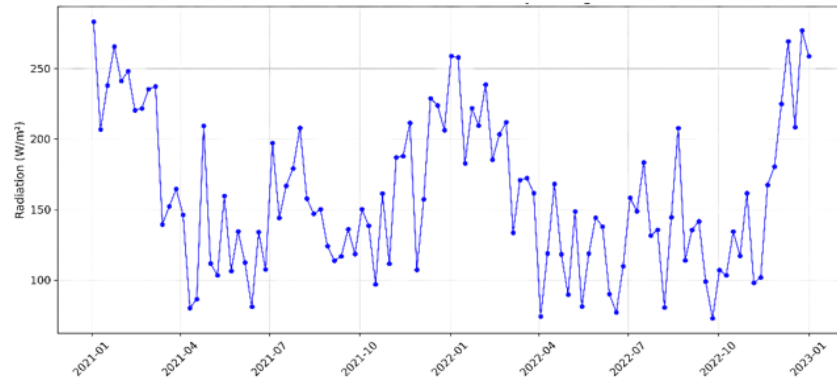


Figure 3. Weekly Average Solar Radiation for the Municipality of Mompox, Bolívar

Source: Authors.

From Figure 3, a pattern of seasonality characterized by recurrent peaks and pronounced valleys can be clearly identified. These higher radiation peaks are consistently observed toward the end and beginning of each year, specifically during the periods of December-January-February and, to a lesser extent, around June-July. Similarly, the minimum radiation values tend to occur in periods such as April-May and October-November, coinciding with climate transition periods. Despite these seasonal fluctuations, the series exhibits variability, suggesting some stationarity in its overall behavior, as the values seem to oscillate around a constant mean without any evident long-term upward or downward trend throughout the two years analyzed. This will be further analyzed in the subsequent phases of the methodology.

In phase 2 of the methodology, the radiation data were captured at a frequency of 1 h, meaning 24 samples per day; therefore, an initial resampling of the time series data was performed at a frequency of 3 h. This process was specifically implemented to achieve greater series smoothing by averaging the radiation every 3 h using the *resample()* function from the pandas library. The goal was to attenuate high-frequency fluctuations, smooth the data trend, and consequently improve the fitted models' efficiency and predictive performance. Likewise, once the series resampling and smoothing were completed, the training and test sets were obtained with a respective ratio of 80% and 20%. Thus, all the radiation data from 2021 were assigned to the training set (80%), while the remaining 20% were derived from the corresponding proportion of the 2022 data. This strategic decision to include a full annual cycle of 2021 in the training set is crucial for the model to thoroughly capture the annual trend and, importantly, the series' inherent seasonality, which is ideal for fitting and improving the performance of models such as ESS, SARIMA, and SARIMAX. Thus, Figure 4 presents the separation of the time series data into the training and test sets, with one data point shown for every 10 points to improve visualization.

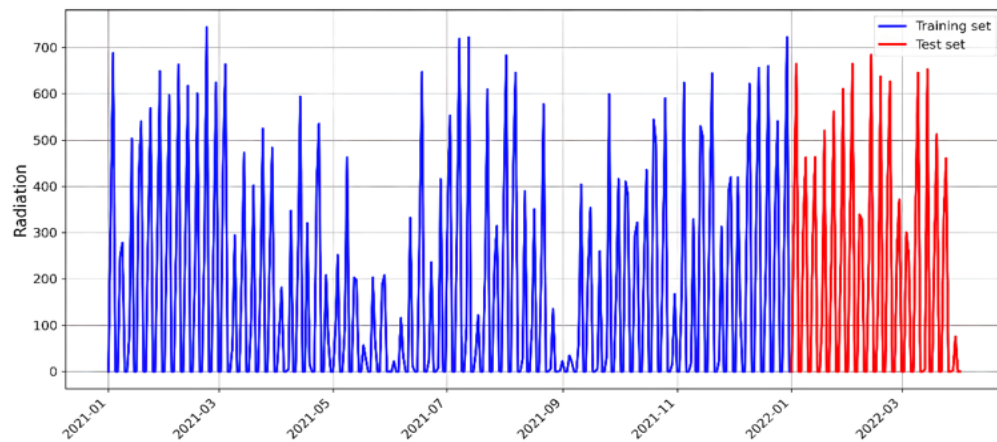


Figure 4. Time series training and test sets.

Source: Authors.

Figure 4 shows the training set of the series in blue (80%), which corresponds to the complete radiation data for 2021 (2920 readings representing the average radiation every 3 h). Likewise, in red, the test set is shown, which corresponds to the portion of the 2022 data, representing one-fifth of the total data or one-fourth of the total training set (730 readings of the average radiation every 3 h).

Once the training and test sets of the time series with the solar radiation data from the municipality of Mompox were obtained, phase 3 of the methodology proceeded with the fitting of the ARIMA, SARIMA, exponential smoothing, and SARIMAX models using the data from the training set of the series. For the ARIMA model, prior to fitting with the training set, the potential model parameters d , p , and q were identified, respectively: the order of differencing required to make the series stationary (d), the order of the autoregressive part (AR) (p), and the order of the moving average part (MA) (q). The estimation of the parameter d was performed using the Dickey-Fuller stationarity test implemented in the Python statsmodel library, while a visual inspection was carried out on the partial autocorrelation and simple autocorrelation plots, respectively, for the potential values of the parameters p and q , to identify the relevant lags, using the same library. Based on this set of potential parameters, iterations were carried out with several ARIMA models using the previously identified combinations of p , q , and d parameters to determine the ARIMA models whose components are significant and, from these, identify the model with the best fit according to the AIC and BIC metrics. In this same regard, the same non-seasonal parameters d , p , and q from the best-fitting ARIMA model were used as reference for the SARIMA and SARIMAX models (the latter including wind speed as an exogenous variable). Then, the seasonal parameters P , D , Q , and s were identified, and systematic iterations were performed over several configurations of these parameters to identify those that provided the best seasonal fit to the observed periodicity in the time series, using the coefficient of determination (R^2). Similarly, the seasonal component was obtained for the exponential smoothing model, which is associated with the parameter of seasonal periods, and

iterations were carried out with different values of this parameter to identify the model with the best seasonal fit according to the R^2 metric. The ARIMA model can be defined according to Equation (1). This formulation is the standard in time series analysis and aligns with [45], who established the theoretical foundation for ARIMA models [45]. Further validation of its application to environmental data can be found in [46].

$$(1 - \phi_1 B - \phi_2 B^2 - \dots - \phi_p B^p)(1 - B)^d y_t = (1 + \theta_1 B + \theta_2 B^2 + \dots + \theta_q B^q) \varepsilon_t \quad (1)$$

Equation (1), which mathematically represents the ARIMA model, y_t corresponds to the time series analyzed at different time periods t ; B represents the lag operator; $(1 - B)^d$ represents the differencing component of order d ; $\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_p$ are the coefficients of the autoregressive (AR) component of order p ; $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_q$ are the coefficients of the moving average (MA) component of order q . For ARIMA models, it is necessary to identify the parameters p , q , and d . The SARIMA model can be mathematically expressed using equation (2). SARIMA's efficacy for seasonal solar radiation data is supported by research from [47], who demonstrated its superiority in capturing periodic patterns in renewable energy datasets [47].

$$\phi(B^s)\phi(B)(1 - B)^d(1 - B^s)^D y_t = \Theta(B^s)\theta(B)\varepsilon_t \quad (2)$$

In equation (2), which mathematically represents the SARIMA model, y_t corresponds to the time series analyzed at different time periods t ; B is the lag operator; $\phi(B)$ is the autoregressive (AR) polynomial of order p ; $\theta(B)$ is the polynomial representing the moving average (MA) of order q ; $(1 - B)^d$ is the differencing operator of order d ; s is the seasonality period parameter; $(1 - B^s)^D$ corresponds to the seasonal differencing of order D ; $\phi(B^s)$ is the seasonal autoregressive polynomial of order P ; and $\Theta(B^s)$ represents the seasonal moving average polynomial of order Q . Thus, the SARIMA model, in addition to the parameters p , q , and d , includes parameters related to seasonality P , D , and Q . In the same regard, equation (3) mathematically represents the SARIMAX model, which is the SARIMA model with an exogenous variable. The integration of exogenous variables follows the framework proposed by [48] for structural time series models [48].

$$\phi(B^s)\phi(B)(1 - B)^d(1 - B^s)^D y_t = \Theta(B^s)\theta(B)\varepsilon_t + \beta X_t \quad (3)$$

Equation (3), which mathematically represents the SARIMAX model, includes, in addition to the same components as in equation (2), X_t , also known as the exogenous variable vector over time, and β , which represents the coefficient vector that measures the influence of X_t on y_t . Finally, equation (4) mathematically represents the exponential smoothing model. This formulation is derived from Holt-Winters' method, as detailed in [49], and is widely used for forecasting seasonal time series in energy applications [50].

$$\hat{y}_{t+h|t} = l_t + hb_t + s_{t+h-m(k+1)} \quad (4)$$

In equation (4), which represents the Exponential Smoothing model, $\hat{y}_{t+h|t}$ represents the forecast for time $t+h$, made at time t ; l_t is the level of the series at time t ; b_t is the estimated trend at time t ; $s_{t+h-m(k+1)}$ is the seasonal component corresponding to $t+h$; h is the number of periods ahead; m is the length of the seasonal cycle, and k is the number of complete cycles that have passed since t .

Finally, in phase 4, the reports for each of the models included the MAE metric, RMSE metric and the coefficient of determination (R^2), both for the training set and the test set, comparing the latter with each model's forecasts. The choice of these metrics was crucial, as RMSE quantifies the average magnitude of the prediction errors, while R^2 allows for evaluating the proportion of variance in the dependent variable that can be predicted from the independent variables, thus determining the best model among the four evaluated. These metrics were also contrasted with a visual inspection, where the training and test sets were compared with the time series model curves.

Results

An initial analysis was performed on the monthly average of the solar radiation values from the time series for the years 2021 and 2022, which are presented in Figure 5. This was done to identify the series' monthly trends, as well as its seasonality and stationarity.

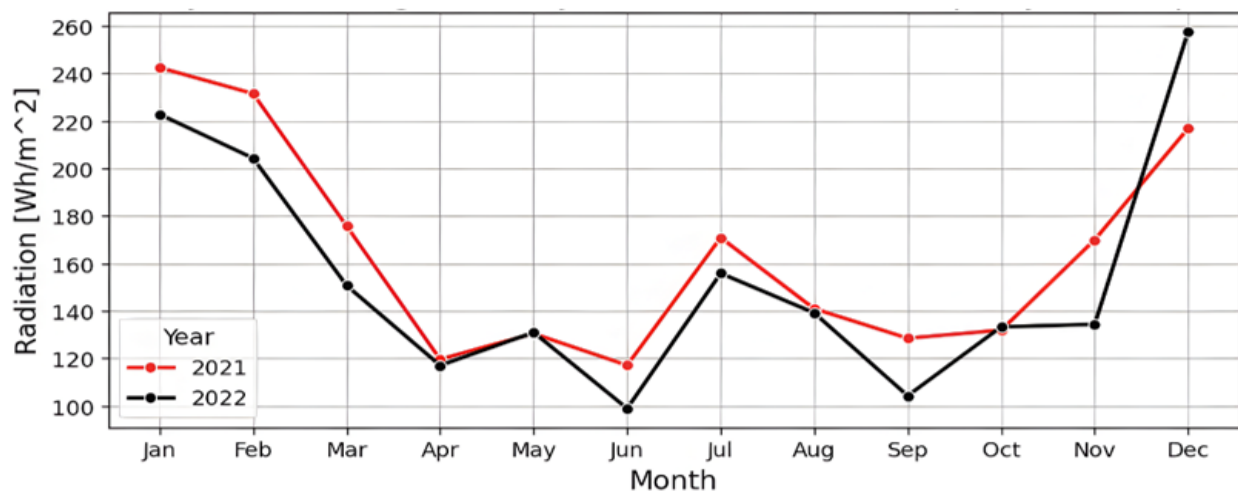


Figure 5. Average monthly radiation in the municipality of Mompox, Bolívar.

Source: Authors.

Based on the results from Figure 5, a clear seasonal trend can be observed throughout 2021 and 2022, such that consistently high radiation values are observed in December in both years, with a secondary peak in January for 2021 and a sharp increase toward December in 2022. Similarly, the minimum radiation values generally occurred between May and June in both years. This seasonal variability, characterized by higher radiation during the dry season (December-March) and lower values coinciding with the rainy season (April-November), is consistent with the Colombian Caribbean region's typical climatic behavior. Thus, December 2022 exhibited the highest radiation peak, approximately 258 Wh/m², while June 2022 recorded the lowest value, approximately 98 Wh/m². The seasonal trend of the series suggests that it can be better modeled using seasonal models than those based purely on stationarity.

Now, regarding the ARIMA model and considering that this model requires the identification of the parameters p , d , and q , the first step is to perform the Dickey-Fuller stationarity test on the initial series, as well as on the first and second differences, to identify the possible values of the parameter d , which refers to the number of times the series needs to be differenced to achieve stationarity. Table 1 presents the results of the Dickey-Fuller test applied to the training set of the series.

Table 1. Results of the Dickey-Fuller test application.

DIFFERENCING OF THE SERIES	DICKEY-FULLER STATISTIC
ORIGINAL SERIES	ADF STATISTIC: -7.509485682578794 P-VALUE: 4.0510952708071326E-11
FIRST DIFFERENCING	ADF STATISTIC: -15.689051499568787 P-VALUE: 1.4413817315620087E-28
SECOND DIFFERENCING	ADF STATISTIC: -22.488760186276057 P-VALUE: 0.0

Source: Authors.

According to the results shown in Table 1, considering the p-value obtained for the original series, as well as for the first and second differencing, in all three cases, the series rejects the null hypothesis of non-stationarity, meaning that the original series, along with its first two differences, are stationary. However, for the original series, the p-value is significantly lower than conventional significance levels, leading to the decisive rejection of the nonstationarity hypothesis.

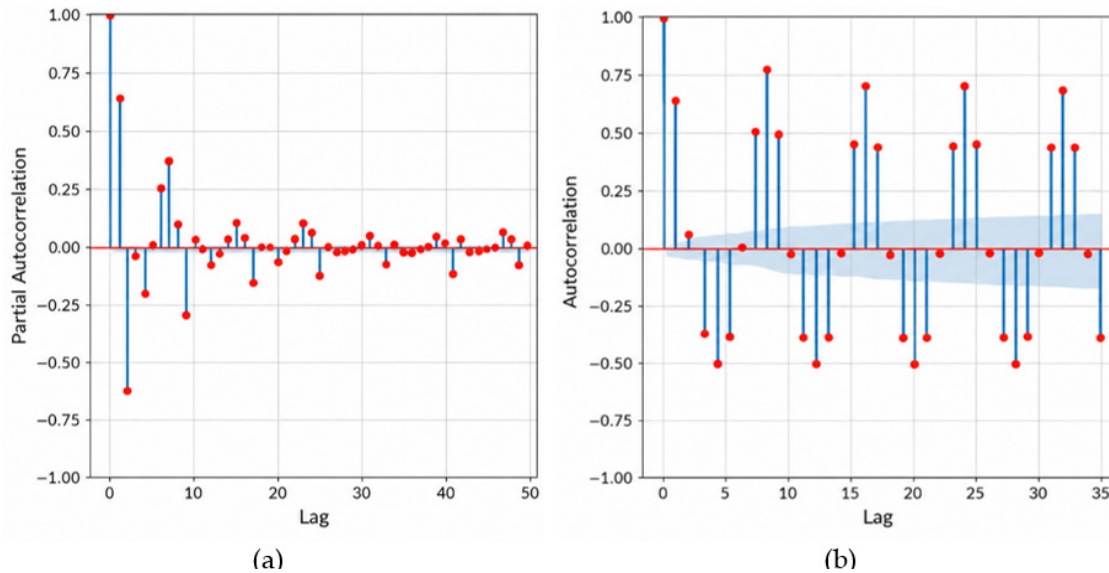


Figure 6. Partial (a) and simple autocorrelation (b) of the original series.

Source: Authors.

Likewise, given that the highly negative ADF statistic for the original series strongly indicates that the series does not contain a unit root and is therefore stationary with an integration order of $d = 0$. Thus, although $d = 1$ and $d = 2$ are feasible, excessive differencing may introduce spurious correlations and reduce the model's interpretability. Regarding the identification of the parameters p and q of the ARIMA model, the process proceeded with the visual analysis of the partial and simple autocorrelation of the original series using a lag number of 35, which corresponds to approximately 10% of the training data.

From Figure 6, a significant peak is observed at the first lag (lag 1) in the partial autocorrelation (PACF) plot (Figure 6a), suggesting a strong direct correlation. Likewise, the PACF plot shows other notable peaks at lags 2 and 3, as well as at 7, 8, 11, 12, 13, and 14, among others, which cross the significance threshold, indicating that the current radiation is influenced by values up to three months prior and also by more complex seasonal or sub-seasonal patterns, offering potential values for the autoregressive order (p) that could include 1, 2, 3. On the other hand, the ACF plot (Figure 6b) shows a gradual decay, which is consistent with a stationary series. Therefore, significant peaks are identified at lags 1, 2, and 3, along with patterns that repeat annually (lag 12, 24, etc.) and subannually (lag 6, 7), crossing the significance threshold. This suggests the presence of moving average components (q) that could be 1, 2, 3, reflecting past errors' dependencies. The persistence of autocorrelation at multiples of 12 also suggests potential seasonality in the moving average. Therefore, it is important to evaluate the significance of the components in the equation for ARIMA models, considering the possible ranges of the previously identified parameters p , q , and d .

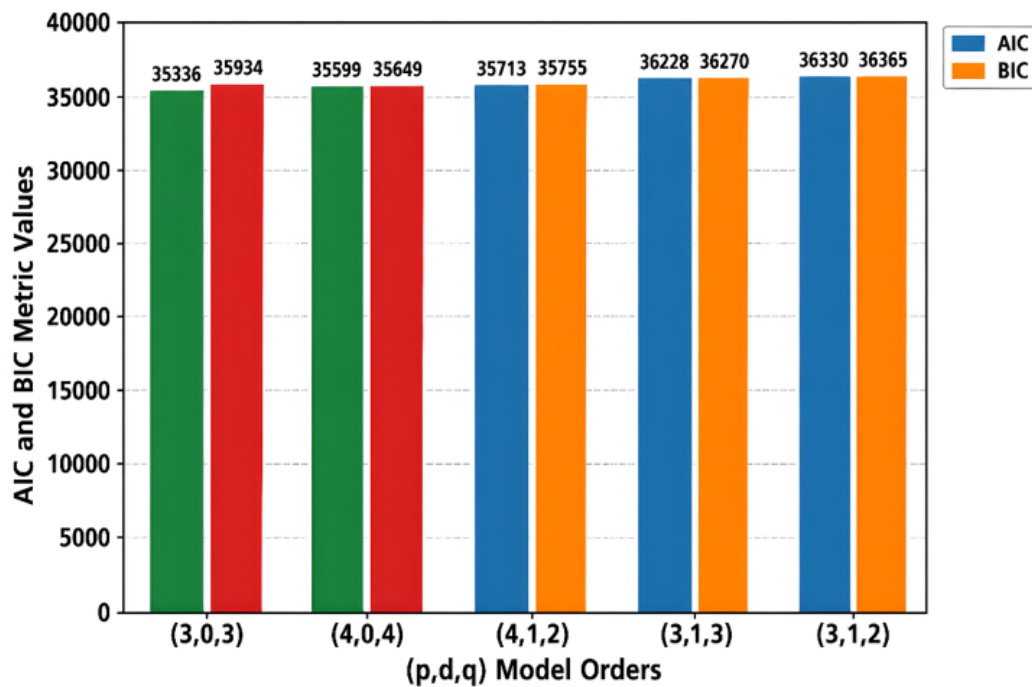


Figure 7. Comparison of the 5 ARIMA models with the best AIC and BIC metrics.

Source: Authors.

Once the evaluation of the different ARIMA models was carried out, it was found that the 10 models whose equation components are significant ($p\text{-value} < 0.05$) and also provide a better fit according to the AIC and BIC fit and goodness metrics are: ARIMA(2,0,1), ARIMA(2,1,1), ARIMA(3,1,1), ARIMA(4,0,0), ARIMA(2,1,2), ARIMA(3,1,2), ARIMA(3,1,3), ARIMA(4,1,2), ARIMA(4,0,4), and ARIMA(3,0,3). In this regard, Figure 7 presents a graph that allows comparing the top 5 models based on the AIC and BIC metrics from the 10 models mentioned earlier, which help identify the models with the best optimal trade-off between fit and complexity, indicating that they allow for selecting the most parsimonious model without sacrificing the goodness of fit.

Figure 7 shows that the ARIMA (3,0,3) model achieves the lowest values in the AIC and BIC metrics, indicating that it is the model with the best fit for the evaluated solar radiation time series, capturing temporal dependencies and underlying patterns in the data more accurately. Figure 8 shows the comparison of the fit of the ARIMA (3,0,3) model against the training and test data of the time series.

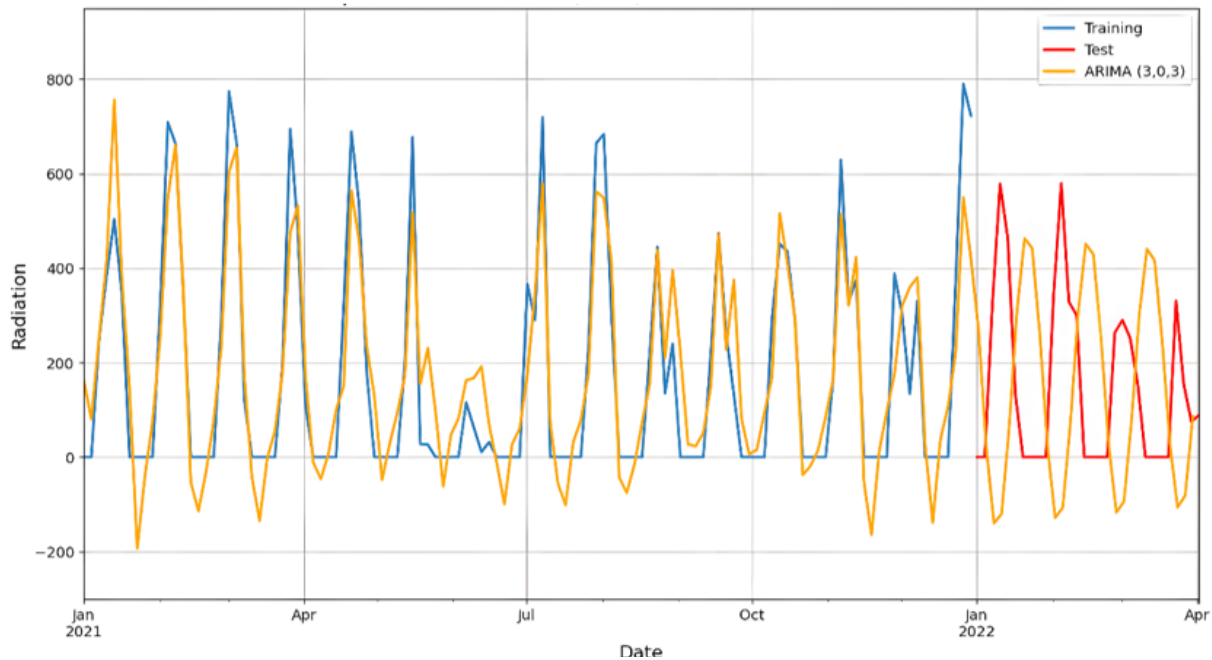


Figure 8. Comparison of the ARIMA (3,0,3) model with the time series data.

Source: Authors.

In Figure 8, it is possible to observe how the ARIMA(3,0,3) model attempts to closely follow the peaks and valleys presented in the training set, while the model's predictions show lower precision and less adherence to the fluctuations. The metrics obtained in the coefficient of determination (R^2), which is 0.7751 for the training set and 0.7031 for the test set, more clearly demonstrate this. That is, while the fit in the training set is good, with 77.51% of variability explained, the fit in the test set is moderate, explaining only 70.31% of the variability, reflecting a loss in the model's ability to generalize the fluctuations in the test set.

Regarding the SARIMA time series model, it was found that starting with the p , d , and q parameters of the ARIMA (3,0,3) model, the 5 models that are significant in their components and provide the best fit when iterating over the seasonal parameters P , D , Q , and s are presented in Figure 9.

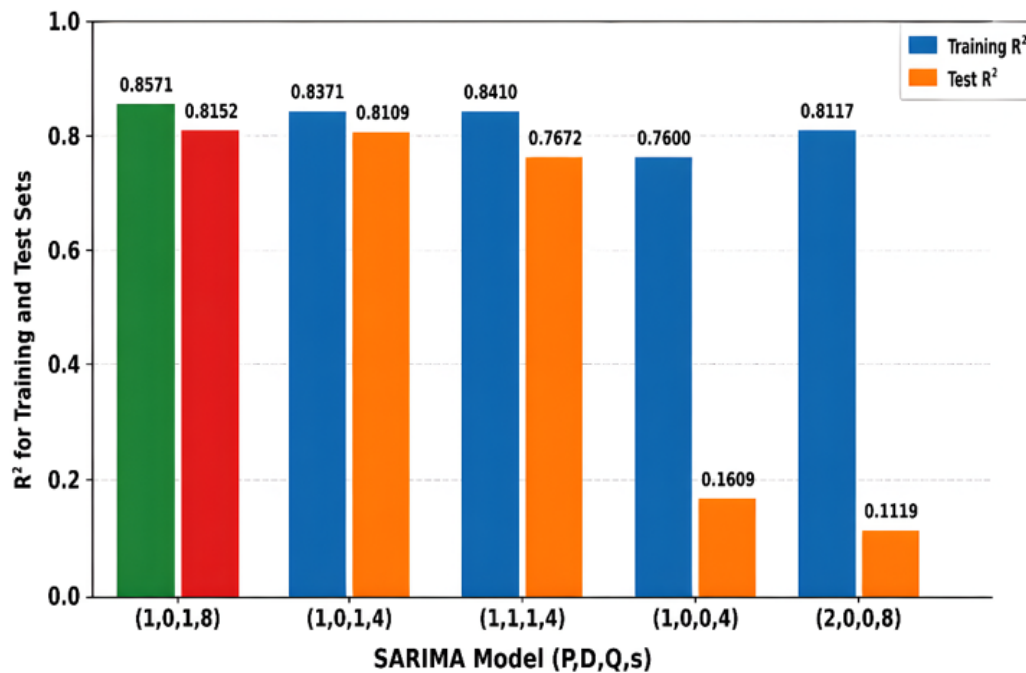


Figure 9. SARIMA models with the best fit in the training and testing datasets.

Source: Authors.

According to the results presented in Figure 9, the SARIMA model with the best fit is the one with the parameters P, D, Q, and S: 1, 0, 1, 8, which indicates that the seasonal period fits best every 24 hours because the data were captured every 3 hours. This seasonality can be explained by the fact that the dataset corresponds to solar radiation data from the municipality of Mompox, which follows a daily cycle characterized by variations in radiation throughout the day, making the SARIMA model with these parameters well-suited to capture the solar fluctuations that repeat over a 24-hour cycle. Figure 10 shows the comparison of the fit of the SARIMA model with the parameters P, D, Q, and s (1,0,1,8) against the training and test data of the time series.

Figure 10 shows how the SARIMA model with the best fit accurately follows both the training and test sets of the solar radiation time series from the municipality of Mompox. This good fit is clearly reflected in the coefficients of determination (R^2), which are 0.8571 for the training set and 0.8152 for the test set, indicating that the model explains 85.71% and 81.52% of the variability in the training and test data, respectively, demonstrating that the model maintains a high level of explainability and good performance in both datasets, suggesting an excellent ability to generalize the fluctuations in solar radiation.

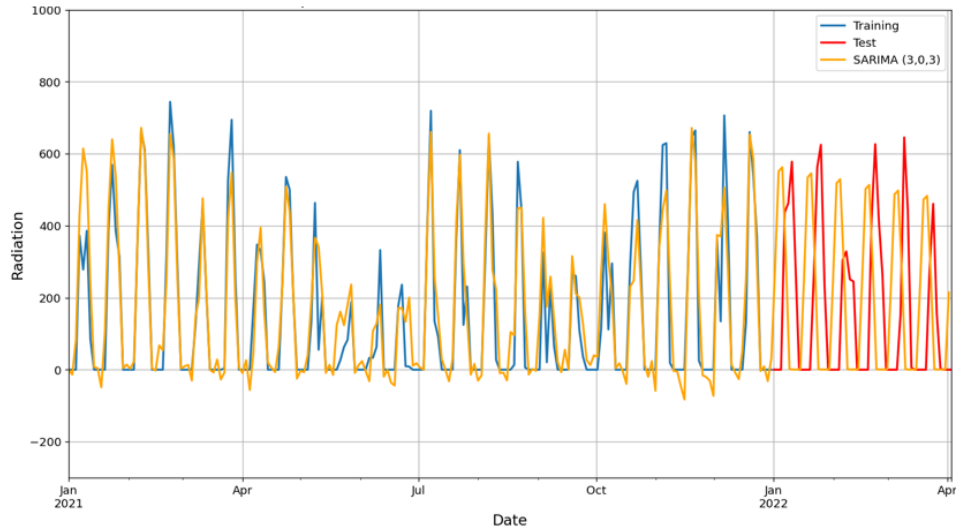


Figure 10. Comparison of the SARIMA model and time series data.

Source: Authors.

Wind speed was taken as the exogenous variable in the SARIMAX model, which was also partitioned into the training and test sets and included in the SARIMA model with the best fit (seasonal order (1,0,1,8)). Thus, Figure 11 presents a graph in which the obtained SARIMAX model is compared against the training and test sets of the solar radiation time series.

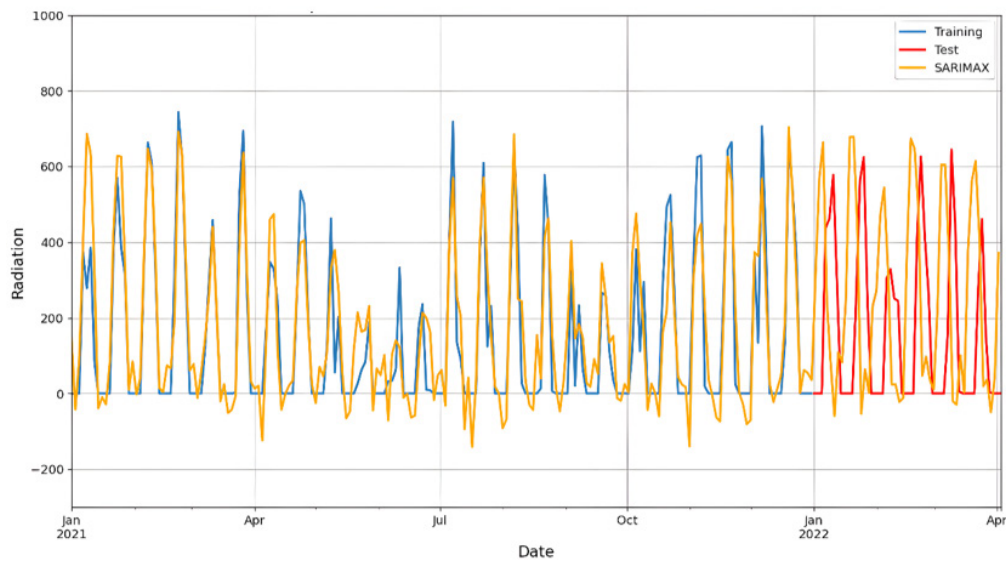


Figure 11. Comparison of the SARIMAX model and time series data.

Source: Authors.

Figure 11 shows how the SARIMAX time series model, which incorporates the exogenous variable wind speed, provides a good fit in the training set, which is comparable to the performance of the SARIMA model. However, the fit or performance of the model in the test set is lower than that of the SARIMA model. This is clearly reflected in the determination coefficients obtained by the SARIMAX model, which are 0.8203 for the training set and 0.7344 for the test set. The results show that the SARIMAX model explains 82.03% of the variability in the training set but only 73.44% in the test set, suggesting that its generalization ability is lower than that of the SARIMA model, especially when facing data not observed during training.

Finally, the graph shown in Figure 12 is obtained when adjusting and evaluating the exponential smoothing model against the training and test sets of the series. In this case, the model achieved the highest performance with a seasonal parameter s of 272.

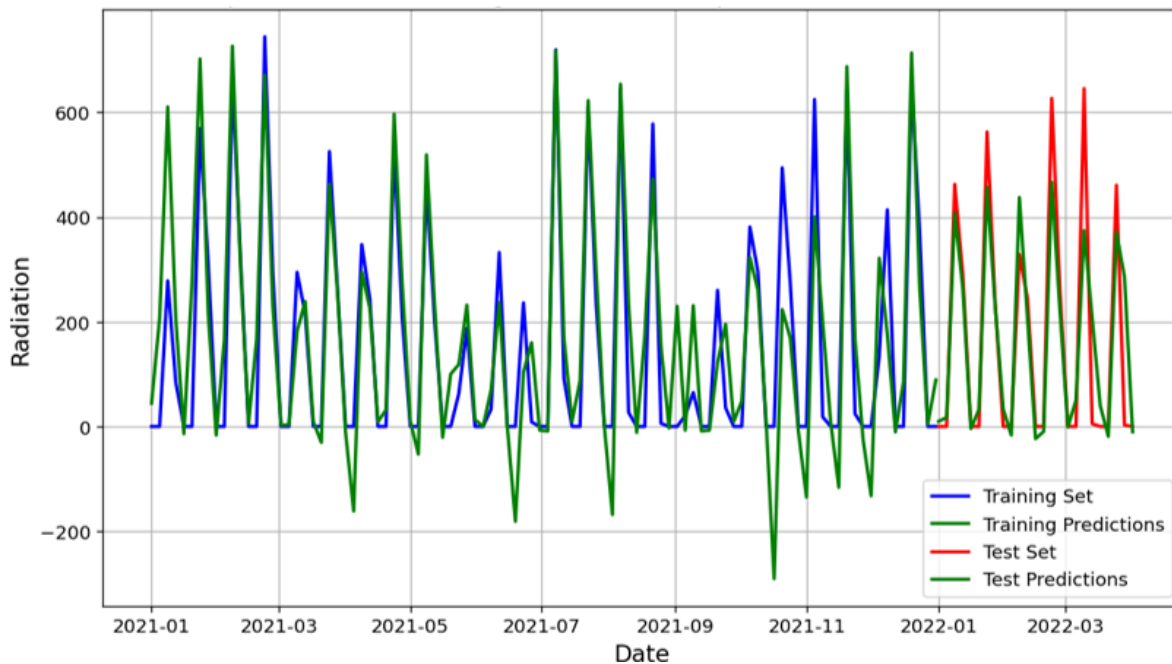


Figure 12. Comparison of the exponential smoothing model with respect to the time series data.

Source: Authors.

In Figure 12, it is possible to observe how the exponential smoothing model presents valleys below zero in the curve, which are more pronounced compared to the ARIMA and SARIMA models, although it attempts to closely follow the fluctuations of the time series. According to the above, the coefficient of determination obtained for the training set is 0.7863, whereas that for the test set is 0.7561, indicating that the model explains 78.63% and 75.61% of the variability in the training and test sets, respectively.

this shows a moderate performance of the exponential smoothing model, which is superior only to the ARIMA(3,0,3) model but slightly inferior to the performance of the SARIMA models, which achieve a more robust fit, especially in the test set.

Finally, in order to compare the results obtained by the four evaluated models, Table 2 presents a comparative table with the MAE, RMSE, and R^2 metrics obtained for each model.

Table 2. Error and performance metrics obtained from each model.

DIFFERENCE OF THE SERIES	TRAINING METRICS	TEST METRICS
ARIMA (3,0,3)	MAE: 84.3953 RMSE: 106.0545 R^2 : 0.7751	MAE: 106.0854 RMSE: 130.1029 R^2 : 0.7031
SARIMA (3,0,3,1,0,1,8)	MAE: 58.1052 RMSE: 84.5519 R^2 : 0.8571	MAE: 57.2445 RMSE: 102.6592 R^2 : 0.8152
SARIMAX	MAE: 69.8946 RMSE: 94.8052 R^2 : 0.8203	MAE: 86.7577 RMSE: 123.0639 R^2 : 0.7344
EXPONENTIAL SMOOTHING	MAE: 71.0793 RMSE: 103.3768 R^2 : 0.7863	MAE: 77.4377 RMSE: 118.1749 R^2 : 0.7561

Source: Authors.

According to the results in Table 2, the SARIMA model provides the best fit and lowest error level among the four models, both in the training and test sets, demonstrating consistent performance across both datasets. This is supported by its higher R^2 (0.8571 in training and 0.8152 in testing) and the lowest MAE (58.1052 and 57.2445, respectively) and RMSE (84.5519 and 102.6592, respectively) values. In contrast, the ARIMA (3,0,3) model exhibited the lowest performance in both the training and test sets, with the highest error levels in the MAE and RMSE metrics, particularly with an R^2 of 0.7031 in the test set and an MAE of 106.0854. Based on these findings, it can be concluded that the SARIMA model, built on the ARIMA (3,0,3) model with seasonal parameters (1,0,1,8), is the most effective in characterizing and fitting the time series solar radiation data from the municipality of Mompox, Bolívar. It demonstrates robust predictive capabilities and superior fit in both the training and test data, making it the optimal choice for future estimations.

As a discussion, it is important to mention that this work proposed the characterization of the solar radiation data from the municipality of Mompox-Bolívar as its contribution, as well as the fitting and evaluation of these data using four time series models (ARIMA, SARIMA, SARIMAX, and Exponential Smoothing). For this, the parameters that provide the best fit were determined in each case, taking into

account the fit and goodness metrics (AIC and BIC), as well as the error and performance metrics (MAE, RMSE, and R^2). In this regard, it was first determined that the time series, by default and according to the Dickey-Fuller test, is stationary, justifying the use of time series models for its study and characterization. The stationarity of the series is a key feature that makes time series models, such as ARIMA, SARIMA, or exponential smoothing, particularly suitable for modeling and forecasting solar radiation, as these models are capable of capturing and adjusting the inherent temporal fluctuations and patterns in such data. This finding complements previous research, such as those conducted in [5] and [32]-[34], where descriptive statistics and regression models have primarily addressed characterization, fitting, and prediction. However, these approaches may not be effective in capturing the temporal and seasonal variations in the data given the stationary nature of solar radiation, making time series models more accurate and appropriate for this type of analysis.

These findings agree with previous studies reporting that statistical time-series models constitute robust alternatives for solar radiation forecasting when the analyzed series exhibit stationary and seasonal characteristics. In particular, recent comparative studies have shown that SARIMA models generally outperform conventional ARIMA models when strong periodic patterns are present, since the explicit incorporation of seasonal components allows a more accurate representation of recurrent solar radiation cycles [38], [39]. Similarly, the results obtained in this study indicate that the solar radiation time series in Mompox exhibits a strong seasonal component in addition to stationarity, as evidenced by the superior performance of SARIMA, SARIMAX, and exponential smoothing compared with the best-performing ARIMA model.

Although machine learning models have demonstrated excellent predictive performance in previous studies [29], the results obtained in this work indicate that seasonal statistical models constitute a suitable alternative for the analyzed dataset, offering good predictive performance while maintaining low computational complexity and high interpretability. Likewise, the results obtained for the SARIMAX model indicate that incorporating wind speed as an exogenous variable did not improve the predictive performance achieved by the SARIMA model. Similar observations have been reported in previous studies, where the contribution of exogenous meteorological variables depends strongly on local climatic conditions, data quality, and the degree of correlation between the auxiliary variables and solar radiation. Consequently, the usefulness of incorporating exogenous variables should be evaluated on a case-by-case basis rather than assumed a priori [39], [40].

Unlike many ML approaches, statistical time-series models explicitly preserve the chronological structure of observations and account for temporal dependence. Although recent machine learning and deep learning models have demonstrated excellent predictive capabilities, they generally require larger datasets, multiple meteorological variables, and higher computational resources than classical statistical models [29]. In contrast, using only historical solar radiation observations, the proposed SARIMA

model achieved a good balance between forecasting accuracy, computational simplicity, and model interpretability. This characteristic makes it particularly suitable for regions such as many municipalities in developing countries where long historical records of multiple meteorological variables are not available [38], [39].

Finally, one limitation of stationary and seasonal time-series models is that they require periodic recalibration to adapt to long-term changes in climatic conditions. Climate change may alter solar radiation historical patterns, affecting both seasonal behavior and long-term trends. Consequently, the predictive performance of these models may deteriorate over time if they are not periodically updated. Therefore, future research should investigate adaptive and hybrid forecasting approaches capable of maintaining predictive accuracy under changing climatic conditions. In addition, future studies may evaluate the incorporation of additional meteorological variables and compare the proposed statistical models with state-of-the-art ML and DL approaches using the same dataset and evaluation framework.

Conclusions

This study proposed the characterization, fitting, and comparative evaluation of four classical time-series models (ARIMA, SARIMA, SARIMAX, and Exponential Smoothing) using solar radiation data from the municipality of Mompox-Bolívar. The Dickey-Fuller test confirmed that the analyzed time series is stationary, supporting the application of statistical time-series models for solar radiation forecasting. Furthermore, the superior performance of the seasonal models demonstrated that the solar radiation series exhibits a marked seasonal behavior that can be effectively represented through seasonal statistical models. Beyond the comparative evaluation of forecasting techniques, the main scientific contribution of this work lies in providing a systematic characterization of solar radiation through a unified evaluation framework that integrates stationarity analysis, model comparison, and the assessment of exogenous variables. This distinguishes the proposed methodology from previous studies that have mainly focused on descriptive analyses, regression models, or the application of individual forecasting techniques. In addition, the obtained results provide useful information for estimating the solar potential of Mompox and supporting the planning of photovoltaic energy systems.

At the level of stationary models, it was determined through the Dickey-Fuller stationarity test that the original series, as well as its first and second differences, reject the null hypothesis of non-stationarity. Similarly, through partial and simple autocorrelation, the feasible values for the p and q parameters were determined to be 1, 2, and 3. Thus, by iterating over the different feasible parameters and comparing the fit and goodness metrics, the significant model with the best fit is ARIMA(3,0,3), which achieved a coefficient of determination of 0.7751 for the training set and 0.7031 for the test set, allowing for a moderate adjustment of the model to the data's characteristics.

The SARIMA model based on the ARIMA(3,0,3) model at the stationary level and with a seasonal component (1,0,1,8) had the best fit compared to the SARIMAX (exogenous variable wind speed) and exponential smoothing models. In the training set, it achieved a coefficient of determination of 0.8571, while in the test set, it obtained a coefficient of determination of 0.8152, making it the best-performing model evaluated in this study. In contrast, although the SARIMAX model showed a good fit in the training set, its fit in the test set was moderate. Similarly, regarding the exponential smoothing model, although it closely follows the peaks and fluctuations of the series visually, the pronounced negative valleys affected its fitting capability, resulting in moderate performance for both the training and test sets, but still outperforming the ARIMA model.

Because this research was implemented entirely using free and open-source Python libraries, the proposed methodology can be readily reproduced and adapted for both academic research and practical applications, particularly for solar resource assessment in the Colombian Caribbean region. Specifically, the pandas library was used for temporal indexing and resampling of the data, statsmodels for model identification, fitting, and evaluation, and matplotlib for visualization of the time series and diagnostic plots.

Future research should evaluate forecasting models, such as Meta's Prophet and LSTM neural networks, under the same evaluation framework adopted in this study. Incorporating other meteorological variables, such as cloud cover, temperature, or relative humidity, into SARIMAX and hybrid forecasting models may provide further insight into the contribution of exogenous information to solar radiation prediction. Finally, extending the proposed methodology to other regions of the Colombian Caribbean would allow the evaluation of its robustness under different climatic conditions.

Acknowledgments

This article was developed within the framework of the project: "DESARROLLO SOSTENIBLE MEDIANTE LA IMPLEMENTACIÓN DE ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA EN ZONAS RURALES NO CONECTADAS A LA RED ELÉCTRICA NACIONAL EN MOMPOX, COLOMBIA (022-2024)", which is part of an internal research initiative at the University of Cartagena.

References

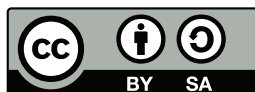
- [1] G. N. Tiwari and L. Sahota, "Solar Radiation and Heat Transfer," 2017, pp. 63–119. [Online]. Available: https://doi.org/10.1007/978-981-10-4672-8_2.
- [2] H. Hissou, S. Benkirane, A. Guezaz, M. Azrour, and A. Beni-Hssane, "A novel machine learning approach for solar radiation estimation," *Sustainability*, vol. 15, no. 13, p. 10609, Jul. 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/su151310609>.

- [3] J. Polo, L. Martín-Pomares, C. A. Gueymard, J. L. Balenzategui, F. Fabero, and J. P. Silva, "Fundamentals: Quantities, Definitions, and Units," 2019, pp. 1–14. [Online]. Available: https://doi.org/10.1007/978-3-319-97484-2_1.
- [4] A. Madhlopa, "Solar Radiation Resource," 2018, pp. 51–64. [Online]. Available: https://doi.org/10.1007/978-3-319-68388-1_3
- [5] W. Contreras Sepúlveda, M. G. Galban Pineda, and S. B. Sepúlveda Mora, "Análisis estadístico de la radiación solar en la ciudad de Cúcuta," *Entre Ciencia e Ingeniería*, vol. 12, no. 23, pp. 16–22, Jun. 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.31908/19098367.3698>.
- [6] A. E. Gürel, Ü. Ağbulut, H. Bakır, A. Ergün, and G. Yıldız, "A state of art review on estimation of solar radiation with various models," *Heliyon*, vol. 9, no. 2, p. e13167, Feb. 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e13167>.
- [7] J. Tovar-Pescador, "Modelling the statistical properties of solar radiation and proposal of a technique based on Boltzmann statistics," in *Modeling Solar Radiation at the Earth's Surface*, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2008, pp. 55–91. [Online]. Available: https://doi.org/10.1007/978-3-540-77455-6_3.
- [8] IEA, "World Energy Outlook 2023," 2023. [Online]. Available: <https://www.iea.org/news/the-energy-world-is-set-to-change-significantly-by-2030-based-on-today-s-policy-settings-alone>.
- [9] E. Alagoz and Y. Alghawi, "The future of fossil fuels: Challenges and opportunities in a low-carbon," *Int. J. Earth Sci. Knowl. Appl.*, vol. 5, no. 3, pp. 381–388, 2023.
- [10] Á. Realpe, J. Garzón, and D. A. Montes, "Mathematical modelling of electric energy potential of Piedra Bolívar Campus of Cartagena University, obtained from solar radiation," *Int. J. ChemTech Res.*, vol. 10, no. 1, pp. 209–214, 2017.
- [11] E. W. Likta, J. K. Gadzama, and D. I. Malgwi, "Evaluation of solar energy potentials for power energy generation in Maiduguri, Borno State," *FUDMA J. Sci.*, vol. 7, no. 3, pp. 223–231, Jul. 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.33003/fjs-2023-0703-1863>.
- [12] S. A. Shehzad, T. Hayat, A. Alsaedi, and B. Chen, "A useful model for solar radiation," *Energy, Ecol. Environ.*, vol. 1, no. 1, pp. 30–38, Feb. 2016. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/s40974-016-0014-y>
- [13] N. Kannan and D. Vakeesan, "Solar energy for future world: A review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 62, pp. 1092–1105, Sep. 2016. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.05.022>
- [14] P. Nikolaidis, "Solar energy harnessing technologies towards de-carbonization: A systematic review of processes and systems," *Energies*, vol. 16, no. 17, p. 6153, Aug. 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/en16176153>
- [15] S. Dixit, "Solar technologies and their implementations: A review," *Mater. Today Proc.*, vol. 28, pp. 2137–2148, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.04.134>
- [16] N. K. Sharma, P. K. Tiwari, and Y. R. Sood, "Solar energy in India: Strategies, policies, perspectives and future potential," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 16, no. 1, pp. 933–941, Jan. 2012. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.09.014>
- [17] H. S. K. Nathan, "Solar energy for rural electricity in India: A misplaced emphasis," *Econ. Polit. Wkly.*, vol. 49, no. 50, pp. 60–67, 2014

- [18] F. M. Guangul and G. T. Chala, "Solar energy as renewable energy source: SWOT analysis," in *2019 4th MEC International Conference on Big Data and Smart City (ICBDSC)*, IEEE, Jan. 2019, pp. 1–5. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/ICBDSC.2019.8645580>
- [19] R. V. Moharir and S. S. Dodani, "Solar energy as an energy source: An approach," *IOSR J. Mech. Civ. Eng.*, vol. 14, no. 3, pp. 87–92, Jun. 2017. [Online]. Available: <https://doi.org/10.9790/1684-1403058792>.
- [20] R. Nasrin, M. Hasanuzzaman, and N. A. Rahim, "Effect of high irradiation on photovoltaic power and energy," *Int. J. Energy Res.*, vol. 42, no. 3, pp. 1115–1131, Mar. 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1002/er.3907>
- [21] N. U. Putri, E. Pranita, J. P. Sembiring, A. Jayadi, A. Aryanto, and F. K. Muzamil Suat, "The effect of solar radiation on solar panels in aeroponic plant systems," in *2023 International Conference on Networking, Electrical Engineering, Computer Science, and Technology (IConNECT)*, IEEE, Aug. 2023, pp. 121–126. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/IConNECT56593.2023.10327307>.
- [22] G. Senger, B. Chtirkova, D. Folini, J. Wohland, and M. Wild, "Persistent extreme surface solar radiation and its implications on solar photovoltaics," *Earth's Future*, vol. 12, no. 8, Aug. 2024. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1029/2023EF004266>
- [23] A. Manowska, A. Dylong, B. Tkaczyk, and J. Manowski, "Analysis and monitoring of maximum solar potential for energy production optimization using photovoltaic panels," *Energies*, vol. 17, no. 1, p. 72, Dec. 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/en17010072>
- [24] IPSE, "La energía no es el fin, es el motor de la transformación," Instituto de Planificación y Promoción de Soluciones Energéticas para Zonas No Interconectadas. [Online]. Available: <https://ipse.gov.co/blog/2023/10/05/la-energia-no-es-el-fin-es-el-motor-de-la-transformacion-ipse/>
- [25] R. Právālie, C. Patriche, and G. Bandoc, "Spatial assessment of solar energy potential at global scale: A geographical approach," *J. Clean. Prod.*, vol. 209, pp. 692–721, Feb. 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.10.239>
- [26] H. Khodayar Sahebi, S. Hoseinzadeh, H. Ghadamian, M. H. Ghasemi, F. Esmaeilion, and D. A. Garcia, "Techno-economic analysis and new design of a photovoltaic power plant by a direct radiation amplification system," *Sustainability*, vol. 13, no. 20, p. 11493, Oct. 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/su132011493>
- [27] Ü. Ağbulut, A. E. Gürel, and Y. Biçen, "Prediction of daily global solar radiation using different machine learning algorithms: Evaluation and comparison," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 135, p. 110114, Jan. 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110114>.
- [28] V. Demir and H. Citakoglu, "Forecasting of solar radiation using different machine learning approaches," *Neural Comput. Appl.*, vol. 35, no. 1, pp. 887–906, Jan. 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/s00521-022-07841-x>.
- [29] L. Wang *et al.*, "Prediction of diffuse solar radiation based on multiple variables in China," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 103, pp. 151–216, Apr. 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.12.029>
- [30] Z. Pang, F. Niu, and Z. O'Neill, "Solar radiation prediction using recurrent neural network and artificial neural network: A case study with comparisons," *Renew. Energy*, vol. 156, pp. 279–289, Aug. 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.04.042>

- [31] G. Narvaez *et al.*, “An interactive tool for visualization and prediction of solar radiation and photovoltaic generation in Colombia,” *Big Earth Data*, vol. 7, no. 3, pp. 904–929, Jul. 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1080/20964471.2023.2185920>
- [32] E. Miranda, J. F. G. Fierro, G. Narváez, L. F. Giraldo, and M. Bressan, “Prediction of site-specific solar diffuse horizontal irradiance from two input variables in Colombia,” *Heliyon*, vol. 7, no. 12, p. e08602, Dec. 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e08602>
- [33] G. Valencia, J. Duarte, and L. Obregon, “Global solar radiation prediction in Colombia using a backpropagation neural network architecture,” *Int. Rev. Autom. Control*, vol. 12, no. 6, p. 293, Nov. 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.15866/ireaco.v12i6.18388>
- [34] L. C. Ruiz, D. Amaya, and O. L. Ramos, “Prediction of solar radiation through the ANFIS algorithm,” *Appl. Mech. Mater.*, vol. 823, pp. 389–395, Jan. 2016. [Online]. Available: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.823.389>
- [35] J. Urrego-Ortiz, J. A. Martínez, P. A. Arias, and Á. Jaramillo-Duque, “Assessment and day-ahead forecasting of hourly solar radiation in Medellín, Colombia,” *Energies*, vol. 12, no. 22, p. 4402, Nov. 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/en12224402>
- [36] M. Vanegas Chamorro, E. Villicaña Ortiz, and L. Arrieta Viana, “Cuantificación y caracterización de la radiación solar en el departamento de La Guajira-Colombia mediante el cálculo de transmisibilidad atmosférica,” *Prospectiva*, vol. 13, no. 2, p. 54, Dec. 2015. [Online]. Available: <https://doi.org/10.15665/rp.v13i2.487>
- [37] J. A. Hernández Mora, C. L. Trujillo Rodríguez, and W. A. Vallejo Lozada, “Modelamiento de la irradiancia y la temperatura ambiente utilizando funciones de probabilidad,” *Rev. Tecnura*, vol. 18, no. 39, p. 128, Dec. 2013. [Online]. Available: <https://doi.org/10.14483/udistrital.jour.tecnura.2014.1.a09>
- [38] E. Chodakowska, J. Nazarko, Ł. Nazarko, and H. S. Rabayah, “Solar radiation forecasting: A systematic meta-review of current methods and emerging trends,” *Energies*, vol. 17, no. 13, p. 3156, Jun. 2024. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/en17133156>
- [39] E. Chodakowska, J. Nazarko, Ł. Nazarko, H. S. Rabayah, R. M. Abendeh, and R. Alawneh, “ARIMA models in solar radiation forecasting in different geographic locations,” *Energies*, vol. 16, no. 13, p. 5029, Jun. 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/en16135029>
- [40] G. Carrascal, J. Barrios, F. Ferreira, and J. Plaza, “Solar radiation forecasting: A study case in the Colombian Caribbean region,” *Springer Proc. Math. Stat.*, vol. 469, pp. 199–210, 2025. [Online]. Available: https://doi.org/10.1007/978-3-031-68949-9_15
- [41] J. Nava and P. Hernández, “Optimization of a hybrid methodology (CRISP-DM),” in *Logistics Management and Optimization through Hybrid Artificial Intelligence Systems*, IGI Global, 2012, pp. 356–379. [Online]. Available: <https://doi.org/10.4018/978-1-4666-0297-7.ch014>
- [42] C. Schröer, F. Kruse, and J. M. Gómez, “A systematic literature review on applying CRISP-DM process model,” *Procedia Comput. Sci.*, vol. 181, pp. 526–534, 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.procs.2021.01.199>
- [43] S. Maataoui, G. Bencheikh, and G. Bencheikh, “Predictive maintenance in the industrial sector: A CRISP-DM approach for developing accurate machine failure prediction models,” in *2023 Fifth International Conference on Advances in Computational Tools for Engineering Applications (ACTEA)*, IEEE, Jul. 2023, pp. 223–227. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/ACTEA58025.2023.10193983>

-
- [44] F. Martinez-Plumed *et al.*, “CRISP-DM twenty years later: From data mining processes to data science trajectories,” *IEEE Trans. Knowl. Data Eng.*, vol. 33, no. 8, pp. 3048–3061, Aug. 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/TKDE.2019.2962680>
- [45] G. E. P. Box, G. M. Jenkins, G. C. Reinsel, and G. M. Ljung, *Time Series Analysis: Forecasting and Control*, 5th ed. Wiley, 2015
- [46] R. J. Hyndman and G. Athanasopoulos, *Forecasting: Principles and Practice*. OTexts, 2013.
- [47] Y. Patil, T. Shruti, and R. K., “Time-series forecasting using ARIMA and SARIMA models for solar NASA POWER data,” in *2025 3rd International Conference on Intelligent Systems, Advanced Computing and Communication (ISACC)*, IEEE, Feb. 2025, pp. 946–952. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/ISACC65211.2025.10969243>
- [48] D. K. Wijaya, R. Widjaya, A. Kurniawan, and Diana, “Using time series analysis to predict earthquake,” in *2024 International Conference on Artificial Intelligence, Blockchain, Cloud Computing, and Data Analytics (ICoABCD)*, IEEE, Aug. 2024, pp. 25–30. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/ICoABCD63526.2024.10704296>
- [49] E. S. Gardner, “Exponential smoothing: The state of the art,” *J. Forecast.*, vol. 4, no. 1, pp. 1–28, Jan. 1985. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1002/for.3980040103>.
- [50] S. Dev, T. AlSkaif, M. Hossari, R. Godina, A. Louwen, and W. van Sark, “Solar irradiance forecasting using triple exponential smoothing,” in *2018 International Conference on Smart Energy Systems and Technologies (SEST)*, IEEE, Sep. 2018, pp. 1–6. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/SEST.2018.8495816>





Análisis comparativo de la estabilización de suelos derivados de ceniza volcánica con cal, ceniza de fondo y estabilizante comercial

Comparative analysis of volcanic ash-derived soil stabilization using lime, brick slag ash, and a commercial stabilizer

Laura Alejandra Muñoz ¹, Isabella Rodríguez Castro ²,
Andrea Carolina Paredes Cerón ³, Lucio Gerardo Cruz Velasco ⁴

Fecha de Recepción: 01 de octubre de 2025

Fecha de Aceptación: 5 de marzo de 2026

Cómo citar: L. A. Muñoz, I. Rodríguez Castro, A. C. Paredes Cerón, y L. G. Cruz Velasco, «Análisis comparativo de la estabilización de suelos derivados de ceniza volcánica con cal, ceniza de fondo y estabilizante comercial», *Tecnura*, vol. 30, n.º 89, jul. 2026. 72–88. <https://doi.org/10.14483/22487638.24175>

Resumen

Objetivo: evaluar el comportamiento de suelos derivados de cenizas volcánicas del departamento del Cauca (Colombia) mediante su estabilización con tres materiales: cal, ceniza de escoria de ladrillo (CEL) y un estabilizante comercial a base de sodio y calcio, y analizar su efecto en la plasticidad y la resistencia a la compresión confinada.

Métodología: se emplearon tres muestras de suelo con alta plasticidad y susceptibilidad a la humedad. Las muestras fueron tratadas con distintos porcentajes de estabilizantes: cal (3 %, 5 % y 7 %), ceniza de escoria de ladrillo (15 %, 20 % y 25 %) y estabilizante comercial (15 %, 18 % y 21 %). Posteriormente, se realizaron ensayos de límites de Atterberg y compresión confinada tras periodos de curado de 1, 7, 14 y 28 días, evaluando tanto el estado seco como el estado de saturación.

Resultados: los tres estabilizantes lograron reducir la plasticidad de los suelos entre un 5 % y un 80 %, con incrementos en la resistencia a la compresión confinada de hasta ocho veces en estado seco. Sin embargo, los tratamientos con cal y con el estabilizante comercial presentaron variaciones abruptas en sus valores de resistencia entre dosificaciones.

Conclusiones: en estado seco, tanto la ceniza de escoria de ladrillo como el estabilizante comercial pueden considerarse alternativas viables para incrementar la resistencia y reducir la plasticidad en suelos derivados de cenizas volcánicas. No obstante, su

¹ Ingeniera civil y magíster en Ingeniería de pavimentos de la Universidad del Cauca. Miembro del GEPAV (Grupo de Investigación en Geotecnia Vial y Pavimentos Unicauca).  Email: lalemugarzon@unicauca.edu.co

² Ingeniera civil y magíster en Ingeniería de pavimentos de la Universidad del Cauca. Docente de la Universidad del Cauca y de la Corporación Universitaria Autónoma del Cauca. Miembro del GEPAV (Grupo de Investigación en Geotecnia Vial y Pavimentos Unicauca) y del Grupo de Investigación en Tecnologías y Ambiente (GITA).  Email: isabella.rodriguez.c@uniautonomia.edu.co

³ Ingeniera civil y magíster en Ingeniería Civil (Geotecnia) de la Universidad del Cauca. Docente y miembro del GEPAV (Grupo de Investigación en Geotecnia Vial y Pavimentos Unicauca).  Email: acparedes@unicauca.edu.co

⁴ Ingeniero civil y doctor en Geotecnia. Docente y miembro del GEPAV (Grupo de Investigación en Geotecnia Vial y Pavimentos Unicauca).  Email: lucruz@unicauca.edu.co

desempeño bajo saturación fue limitado, lo que representa una restricción importante en contextos viales expuestos a alta humedad. La cal, en especial al 7 %, fue el único estabilizante que mantuvo resistencia en condición saturada. Sin embargo, mostró comportamientos inestables asociados a la formación de minerales expansivos en suelos con alto contenido de sulfatos. Se recomienda continuar con investigaciones orientadas a optimizar el uso de la ceniza de escoria de ladrillo como alternativa sostenible y de bajo costo, y aplicar un control riguroso en la dosificación de estabilizantes cálcicos para minimizar riesgos de expansión y deterioro a largo plazo.

Palabras clave: estabilización química, estabilizador no convencional, cenizas de fondo de quema, estabilización de suelos, suelos tropicales.

Abstract

Objective: To evaluate the behavior of soils derived from volcanic ash in the department of Cauca (Colombia) through stabilization with three materials: lime, brick slag ash, and a commercial sodium- and calcium-based stabilizer, and to analyze their effect on plasticity and unconfined compressive strength.

Methodology: Three soil samples with high plasticity and moisture susceptibility were treated with different stabilizer percentages: lime (3%, 5%, and 7%), brick slag ash (15%, 20%, and 25%), and commercial stabilizer (15%, 18%, and 21%). Atterberg limits and unconfined compressive strength tests were performed after curing periods of 1, 7, 14, and 28 days, under both dry and saturated conditions.

Results: All three stabilizers reduced soil plasticity between 5% and 80%, with increases in unconfined compressive strength of up to eight times under dry conditions. However, treatments with lime and the commercial stabilizer exhibited abrupt variations in their strength values across dosages.

Conclusions: Under dry conditions, both brick slag ash and the commercial stabilizer can be considered viable alternatives to increase strength and reduce plasticity in volcanic ash soils. However, their performance under saturation was limited, which poses an important restriction in road contexts exposed to high moisture. Lime, particularly at 7%, was the only stabilizer that maintained strength under saturated conditions, although it showed unstable behavior due to the formation of expansive minerals in sulfate-rich soils. Further research is recommended to optimize the use of brick slag ash as a sustainable and low-cost alternative, and to apply strict dosage control of calcium-based stabilizers to minimize risks of expansion and long-term deterioration.

Keywords: Soil chemical stabilization, soil non-conventional stabilizer, coal bottom ash, soil stabilization, Tropical soil.

1. Introducción

Colombia es un país con un déficit significativo en infraestructura vial: solo el 20 % de las vías están pavimentadas y, en la red terciaria, (69.17 % del total) este porcentaje se reduce a 6 % se [1]. En el departamento del Cauca, con una población mayoritariamente rural (62.72 %) y topografía montañosa, la conectividad es aún más limitada [2]. Esta región está influenciada por los volcanes Puracé y Sotará [2], [4], que han dado origen a suelos derivados de ceniza volcánica, caracterizados por alta plasticidad, baja resistencia y comportamiento colapsable lo que dificulta su aplicación en obras viales [5] – [8].

Ante esta problemática, la estabilización de suelos se consolida como una solución efectiva para mejorar el comportamiento de suelos problemáticos en obras viales, especialmente mediante el uso de residuos industriales que ofrecen ventajas económicas y ambientales [9] – [13].

En los últimos años (2021–2025), la estabilización de suelos derivados de ceniza volcánica (SDCV) ha sido ampliamente estudiada debido a su alta variabilidad mineralógica y sensibilidad a cambios de humedad. Investigaciones recientes demuestran que la incorporación de agentes cálcicos y cementantes incrementa significativamente la resistencia a la compresión simple y reduce la plasticidad, particularmente en este tipo de suelos [14]. Asimismo, se ha evidenciado que las condiciones de curado y la exposición a ciclos de humedecimiento influyen de manera determinante en la evolución de la resistencia mecánica [15]. Estudios mineralógicos recientes indican que la presencia de minerales amorfos como alófonos e imogolita pueden modificar la reacción entre el suelo y los estabilizantes, lo cual afecta tanto la formación de productos cementantes como el desempeño bajo saturación [16]. De igual manera, se ha reportado que la durabilidad de los suelos estabilizados depende en gran medida del tipo de ligante empleado y del control de las condiciones ambientales durante el curado [17], [18]. Estos hallazgos demuestran la importancia de considerar tanto la composición mineralógica como las condiciones de humedad al evaluar el comportamiento mecánico de SDCV posterior a la estabilización.

En este contexto, la presente investigación evaluó tres SDCV del Cauca estabilizados con cal, ceniza de fondo de horno de ladrillo (CFH) y un aditivo comercial. Se analizaron sus propiedades físico-mecánicas tras 1, 7, 14 y 28 días de curado. Los resultados mostraron que la CFH en proporciones superiores al 20 % mejoran significativamente la resistencia en estado seco y evidencian su potencial como estabilizante sostenible. Actualmente se realizan ensayos químicos para comprender las variaciones en el comportamiento observado.

2. Metodología

La metodología se desarrolló en cuatro fases. En la primera, se realizó la actualización y revisión de antecedentes nacionales e internacionales sobre estabilización de SDCV mediante estabilizantes y materiales con comportamiento puzolánico. Estudios recientes reportan incrementos significativos en la resistencia a la compresión simple y reducción del índice de plasticidad en SDCV tratados con cal y cemento y destacan la influencia de la mineralogía y las condiciones de curado en la evolución de la resistencia [14]–[15]. Asimismo, se han documentado aplicaciones de residuos industriales con potencial cementante como alternativa sostenible en estabilización vial [16], [18]. Con base en estos antecedentes, se definieron tres porcentajes de adición para cada estabilizante: CFH (15 %, 20 % y 25 %), cal (3 %, 5 % y 7 % de cal útil) y estabilizante comercial D-STB-WAY con base de calcio y magnesio (15%, 18% y 21%). La selección respondió al propósito de comparar dos estabilizantes químicos tradicionales (cal y cemento, con acción puzolánica) frente a un material no tradicional (CFH) con comportamiento potencialmente análogo.

La segunda fase consistió en la recolección y caracterización de tres suelos clasificados como MH (limo de alta plasticidad) según el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS), provenientes del K0+500 vía Popayán–Coconuco (Suelo No.1), la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad del Cauca (Suelo No.2) y el K2+000 vía Timbío–Popayán (Suelo No.3). A las muestras en estado natural se les practicaron ensayos de granulometría, límites de Atterberg y resistencia a la compresión confinada, para establecer sus propiedades físicas y mecánicas iniciales. Los tres estabilizantes provinieron de fuentes locales; el producto comercial fue suministrado por la empresa distribuidora, mientras que la CFH se recolectó en ladrilleras artesanales ubicadas en la vereda El Zarzal, vía Popayán–El Tambo.

En la tercera fase se desarrolló el plan experimental. Se ejecutó el ensayo Proctor estándar con molde japonés para determinar la humedad óptima y la densidad máxima de compactación de cada mezcla. Las combinaciones suelo–estabilizante se prepararon manualmente hasta lograr homogeneidad visual, ajustando el contenido de agua a la humedad óptima correspondiente y compactando inmediatamente con la energía estándar. Las probetas fueron almacenadas en bolsas herméticas para evitar pérdida de humedad y curadas a temperatura ambiente de laboratorio (22–25 °C) durante 1, 7, 14 y 28 días. Para cada combinación se elaboraron tres especímenes por edad de curado y condición de ensayo. La resistencia se evaluó en estado seco y saturado por capilaridad; esta última se logró colocando las probetas sobre una base porosa en contacto con una lámina de agua durante 24 horas, permitiendo el ascenso controlado antes del ensayo.

En la cuarta fase, se analizó comparativamente el comportamiento mecánico y la variación de los límites de Atterberg para los diferentes porcentajes y edades de curado, tras la validación del potencial de estabilización del (CFH) frente a los estabilizantes tradicionales. Los resultados de resistencia corresponden al promedio de tres especímenes por tratamiento derivados de la evaluación de la variabilidad mediante desviación estándar y coeficiente de variación para garantizar representatividad estadística. Finalmente, se definieron porcentajes óptimos de dosificación con base en el incremento de resistencia, la reducción de plasticidad y el desempeño bajo condición de humedad y se estableció la viabilidad técnica del uso de la CFH como alternativa de estabilización en suelos volcánicos del suroccidente colombiano.

3. Resultados

3.1 Límites de Atterberg

Los ensayos de límites de Atterberg realizados en los tres suelos permitieron evaluar el efecto de tres estabilizantes —cal, CFH y un aditivo comercial— sobre su plasticidad. En general, se observó una reducción del Índice de Plasticidad (IP), sin modificaciones en la clasificación SUCS, la cual se mantuvo como limo de alta compresibilidad (MH) como se observa en la [Figura 1](#).

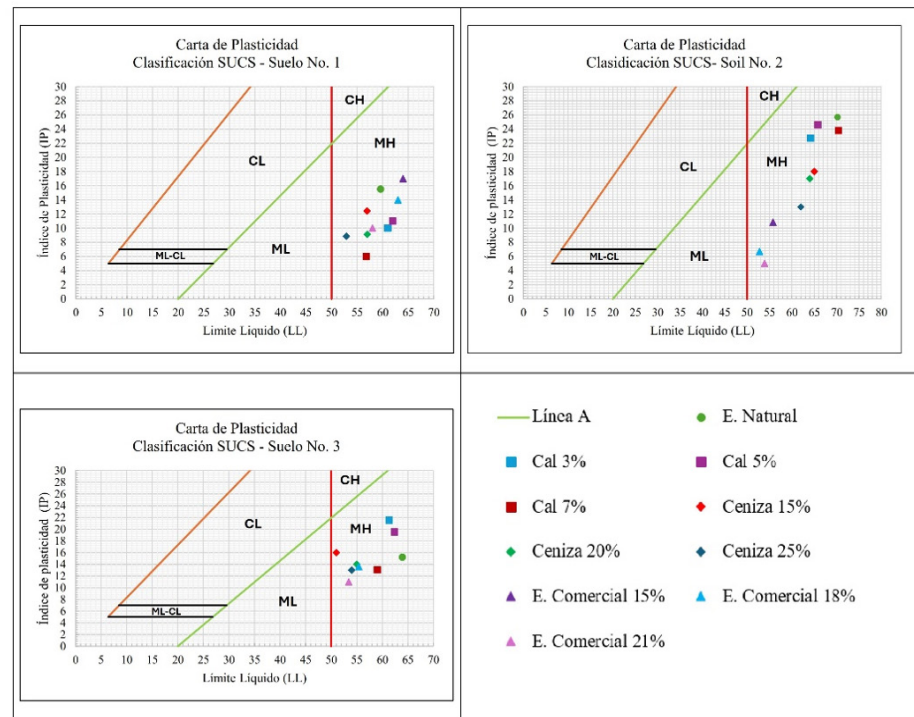


Figura 1. Carta de plasticidad Suelo N°1, Suelo N°2 y Suelo N°3.

Fuente: elaboración propia.

Como se observa en la [Figura 1](#), en el Suelo No.1 la cal al 7 % redujo el IP de 15.5 % a 6 %, siendo la más efectiva. Sin embargo, se observaron aumentos en el LL con cal al 3 % y 5 % y el estabilizante comercial al 15 % y 18 %, posiblemente por formación de estructuras con mayor retención de agua. En el Suelo No. 2, la ceniza al 25 % redujo el IP a 13 %, y el estabilizante comercial al 21 % logró la mayor disminución (IP de 5%). La cal no presentó mejoras relevantes. En el Suelo No. 3, los efectos fueron menores. La ceniza al 25 % redujo el IP a 13 % y el estabilizante comercial al 21 % a 11 %. Solo la cal al 7 % fue efectiva; en otros porcentajes, el IP aumentó, probablemente por formación de compuestos como la etringita y taumasita.

Se realizó un análisis comparativo del comportamiento físico de tres suelos derivados de cenizas volcánicas, estabilizados con cal, ceniza de fondo de ladrillo (CFH) y un aditivo comercial. A continuación, se presenta gráficamente el desempeño por tratamiento. La cal utilizada tiene una pureza del 70 %; sin embargo, las dosificaciones reportadas corresponden a porcentajes teóricos respecto al peso seco del suelo.

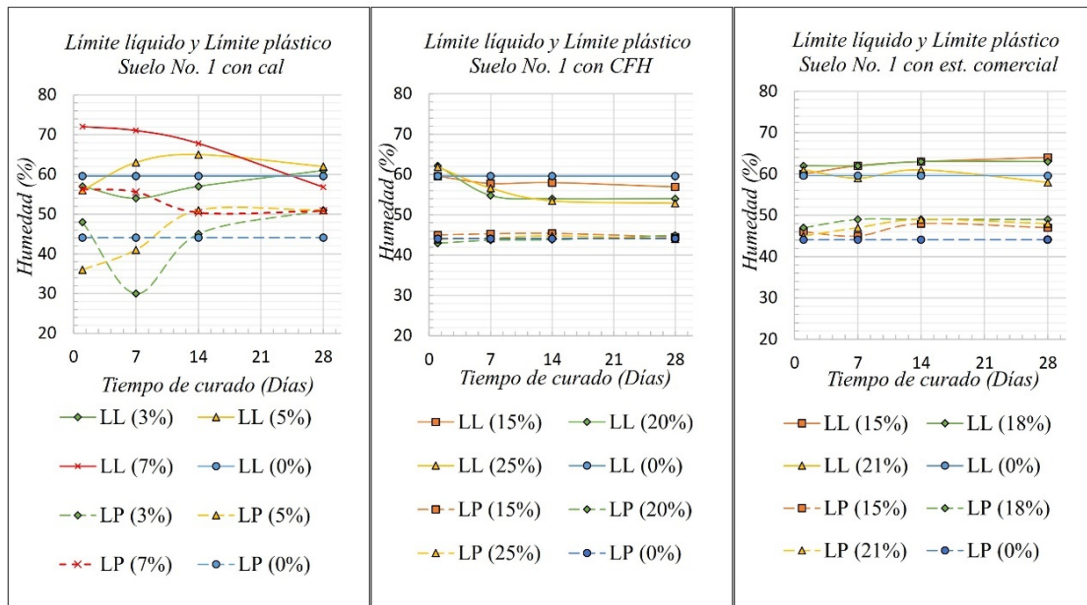


Figura 2. Comparativo LL y LP posterior a la etapa de curado, para los Suelos No.1.

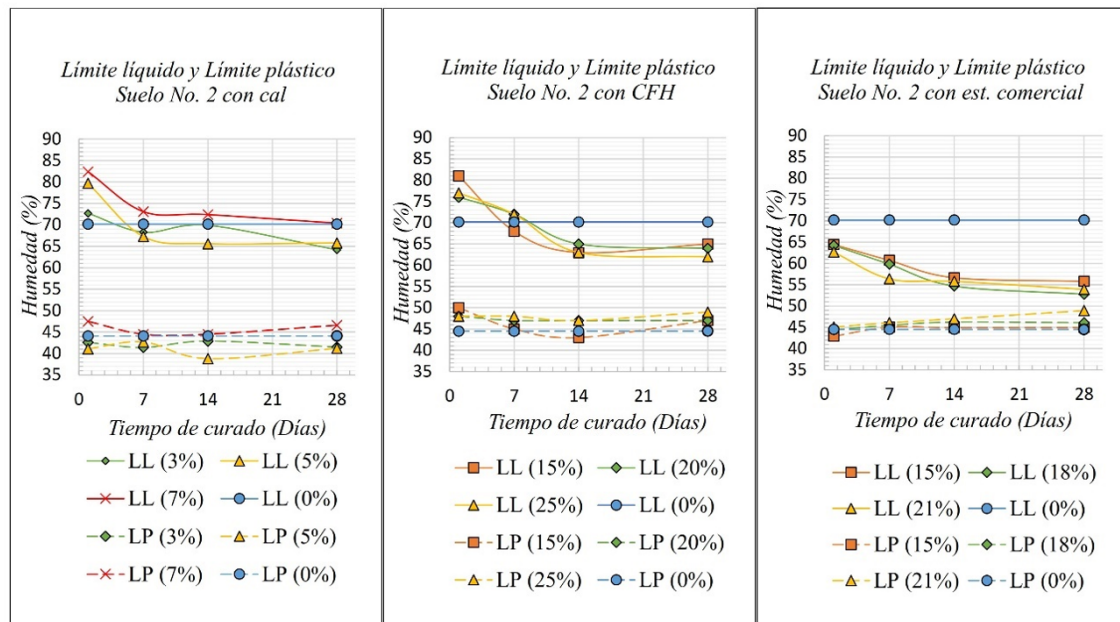


Figura 3. Comparativo LL y LP posterior a la etapa de curado, para los Suelos No.2

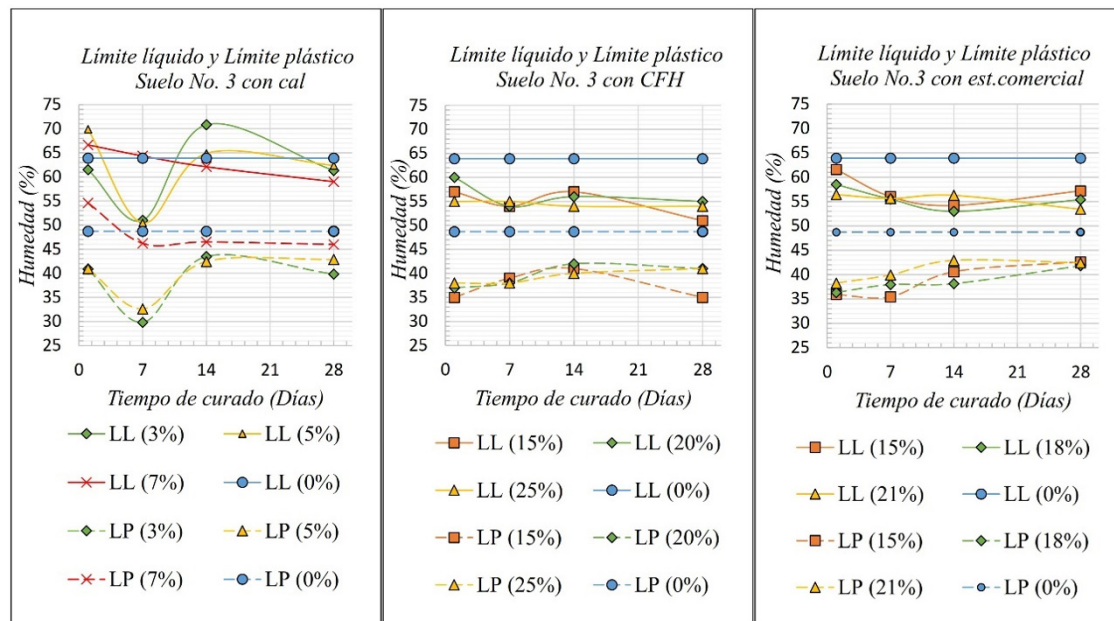


Figura 4. Comparativo LL y LP posterior a la etapa de curado, para los Suelos No. 3.

Fuente: elaboración propia.

Las [Figura 2](#), [Figura 3](#) y [Figura 4](#) muestran la variación del IP en los tres suelos estabilizados. En el Suelo No. 1, la cal al 7 % fue la más eficaz (reducción de IP de 15.5 % a 6 %), seguida de la CFH al 20 % y del estabilizante comercial al 21 % (35 % de reducción). En el Suelo No. 2, con alto contenido de arcilla, la CFH al 25 % logró una reducción del 49% y el estabilizante comercial al 21 % logró una reducción de 81% siendo los más efectivos; mientras que la cal presentó una reducción moderada. En el Suelo No. 3, la estabilización fue limitada: solo la cal al 7 %, la CFH al 25 % y el estabilizante comercial al 21 % lograron reducciones del IP entre 14 % y 28 %. Este suelo mostró menor respuesta, posiblemente por presencia de sulfatos, lo que sugiere necesidad de ajustes en dosificación o métodos.

3.2 Compresión inconfiada

Se realizó el ensayo de compresión inconfiada para evaluar la resistencia de los suelos en estado natural y posterior al curado en estado seco e inmersión, con el fin de analizar el efecto de los estabilizantes sobre la cohesión y capacidad de soporte frente a distintas condiciones de humedad, para mayor referencia ver figuras de la 5 a la 12

3.2.1 Estado seco (sin exposición al agua)

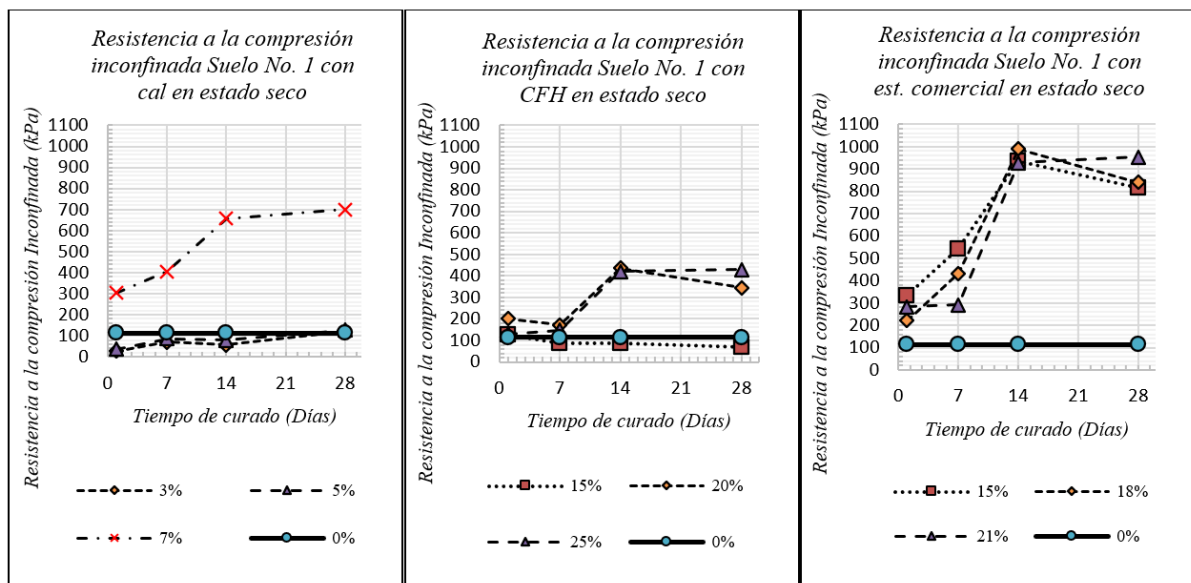
En condición seca (probetas compactadas en condición óptima sin exposición al agua), los tres estabilizantes (cal, ceniza de fondo de ladrillo y estabilizante comercial) incrementaron la resistencia mecánica de los suelos, con variaciones en su efectividad. La [Tabla 1](#) presenta los resultados comparativos, incluyendo la resistencia del suelo no tratado como referencia.

Tabla 1. Resultados de compresión inconfiada (UCS) en [kPa] para el estado seco

UCS [kPa]	Suelo 1	Suelo 2	Suelo 3
Resistencia inicial	113.5	228.8	227.6
Cal - 3%	119	445	112.7
Cal - 5%	126	745	242.6
Cal - 7%	699	456	651.6
Ceniza - 15%	39.6	190.8	102.9
Ceniza - 20%	170	570.8	612.0
Ceniza - 25%	221	539.7	627.0
Comercial - 15%	816.7	1064.0	250.2
Comercial - 18%	840.5	1019.1	271.3
Comercial - 21%	953.7	1263.6	185.5

Fuente: elaboración propia.

En estado seco, el Suelo No. 1 mostró la mayor resistencia con el estabilizante comercial al 21 % (8.4 veces), seguido de cal al 7 % (6 veces) y ceniza al 25 % (3.7 veces). En el Suelo No. 2, el estabilizante comercial al 21 % fue el más efectivo logrando un incremento de 5.5 veces, seguido de la cal al 5 % (3.3) y ceniza al 20 % (2.5). En el Suelo No. 3, la cal al 7 % logró incrementar la resistencia en 2.9 veces y la ceniza al 25 % (2.7), superando al estabilizante comercial, que mostró baja eficacia (1.2 veces al 18 %). De manera grafica se presenta el análisis comparativo de los resultados obtenidos para la condición en estado seco en las [Figura 5](#), [Figura 6](#) y [Figura 7](#).

**Figura 5.** RCI en estado seco para Suelo No.1 con la adición de los 3 estabilizantes.

Fuente: Elaboración propia.

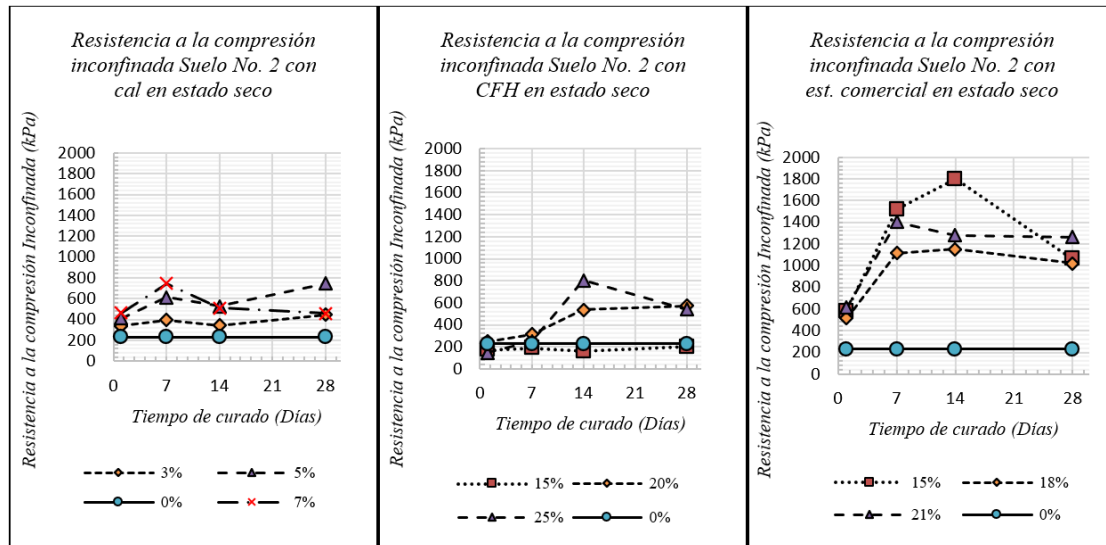


Figura 6. RCI en estado seco posterior a la etapa de curado, para el suelo N°2.

Fuente: elaboración propia.

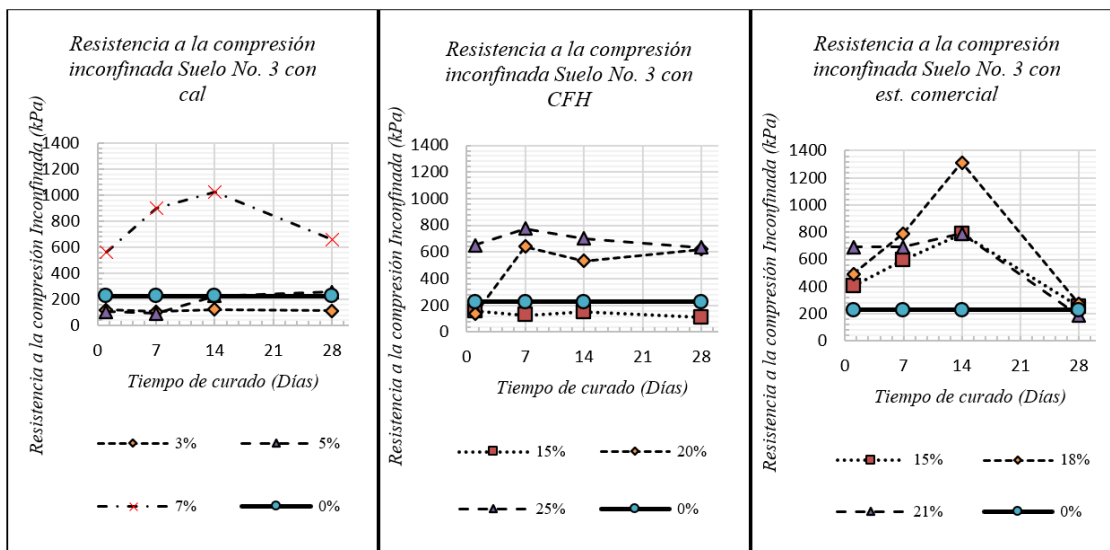


Figura 7. RCI en estado seco para el Suelo No. 3 con la adición de los 3 estabilizantes.

Fuente: elaboración propia.

La mayor resistencia a la compresión, en seco y por capilaridad, se obtuvo con 7 % de cal lo cual indica que esta dosificación activa eficientemente las reacciones puzolánicas. La ceniza al 20 % y 25 % también mejoró la resistencia, por la formación de compuestos cementantes entre sus óxidos y los minerales del suelo [17]. El estabilizante comercial fue eficaz en todas las proporciones, destacando el 21 % por su alta reactividad con calcio, magnesio y fósforo [18].

3.2.2 Estado en capilaridad por 24h

Bajo esta condición, que simula la absorción de humedad desde la base del suelo, los estabilizantes continuaron mostrando efectos positivos, aunque con variaciones importantes según el tipo de suelo (Ver [Tabla 2](#)).

Tabla 2. Resultados de compresión inconfiada (UCS) en [kPa] para el estado en capilaridad

Parameter [kPa]	Suelo 1	Suelo 2	Suelo 3
Resistencia inicial	17.7	36.0	77.42
Cal – 3%	32.2	105	93.0
Cal – 5%	75.5	189	224.
Cal – 7%	653	451	387.0
Ceniza – 15%	9.9	230.7	62.0
Ceniza – 20%	80.0	233.2	92.0
Ceniza - 25%	71.0	162.5	78.0
Comercial – 15%	219.7	116.1	30.04
Comercial – 18%	145.3	106.4	32.20
Comercial – 21%	182.5	177.7	19.35

Fuente: elaboración propia.

De manera grafica, se presenta el análisis comparativo de los resultados obtenidos para la condición en estado saturado por capilaridad en las [Figura 8](#), [Figura 9](#) y [Figura 10](#).

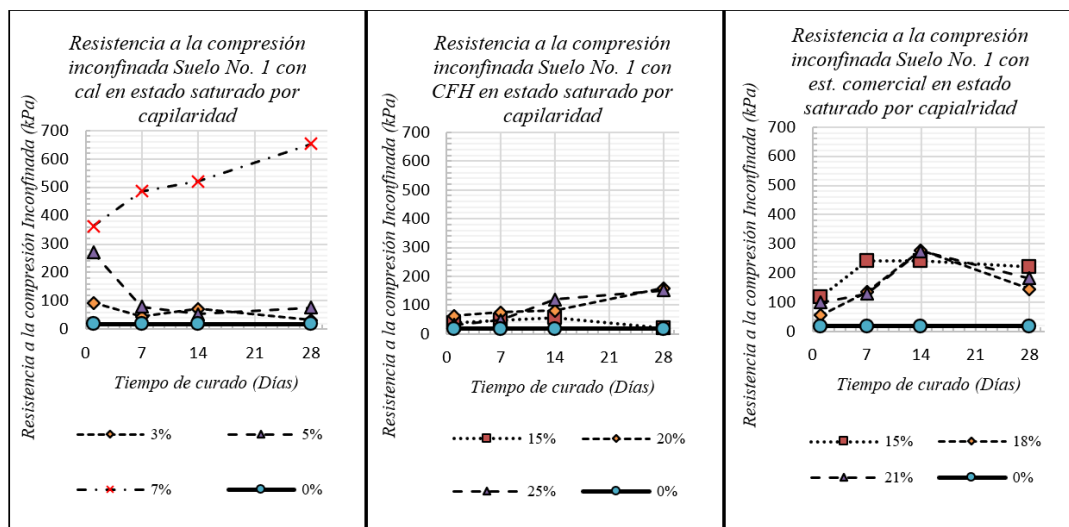


Figura 8. RCI en saturación por capilaridad para el Suelo No.1 con la adición de los 3 estabilizantes.

Fuente: elaboración propia

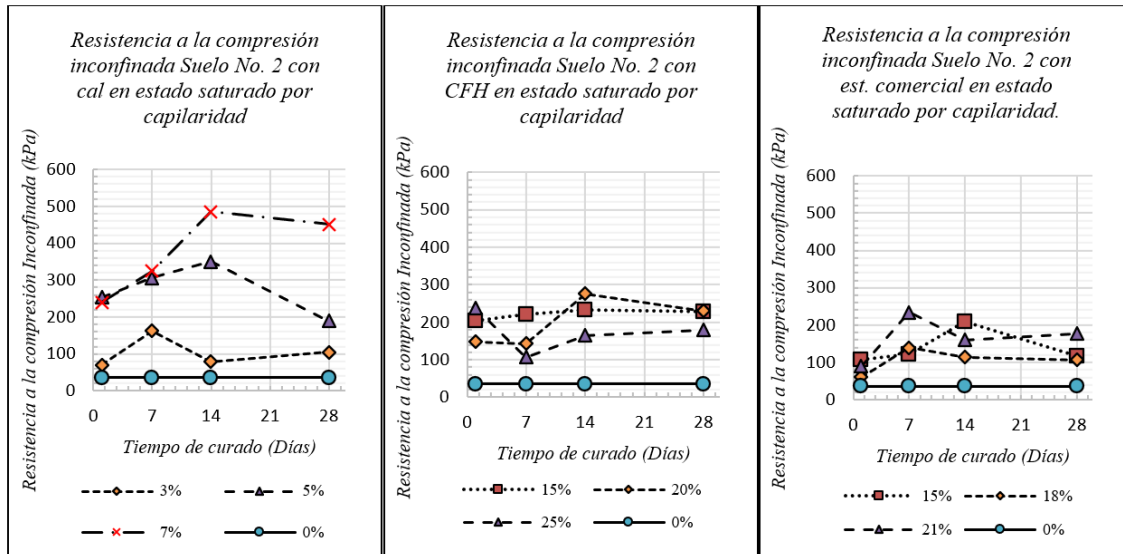


Figura 9. RCI en saturación por capilaridad posterior a la etapa de curado, para el suelo N°2.

Fuente: elaboración propia.

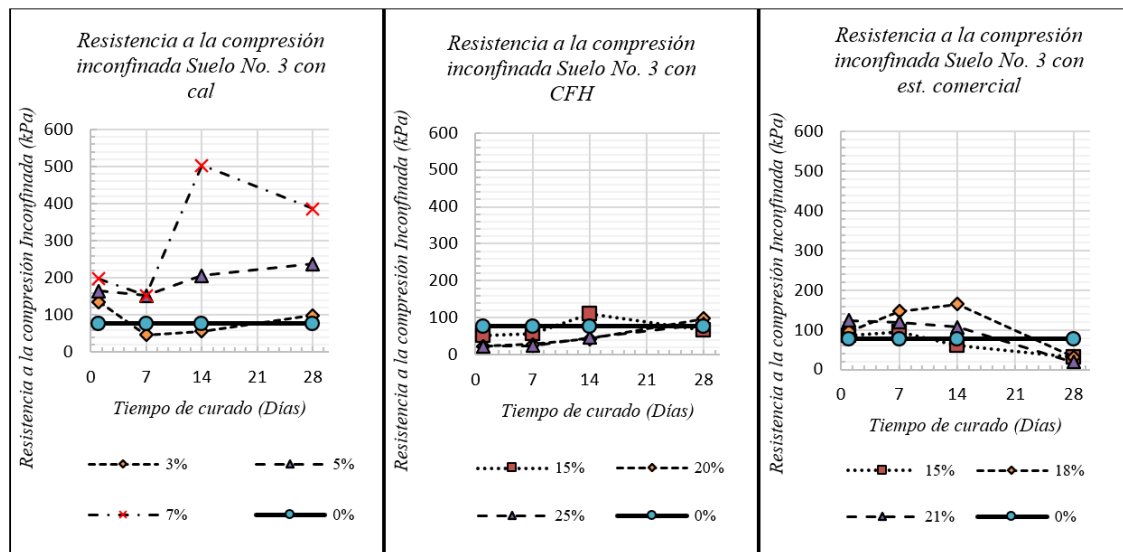


Figura 10. RCI en saturación por capilaridad para el Suelo No.3 con la adición de los 3 estabilizantes.

Fuente: elaboración propia.

3.2.3 Estado de inmersión por 1h

Esta condición representa el escenario más crítico, al exponer los suelos completamente al agua. En este contexto, solo algunos estabilizantes mantuvieron o mejoraron significativamente la resistencia del suelo como se presenta en la [Tabla 3](#).

Tabla 3. Resultados de compresión inconfiada (UCS) en [kPa] para el estado saturado por inmersión

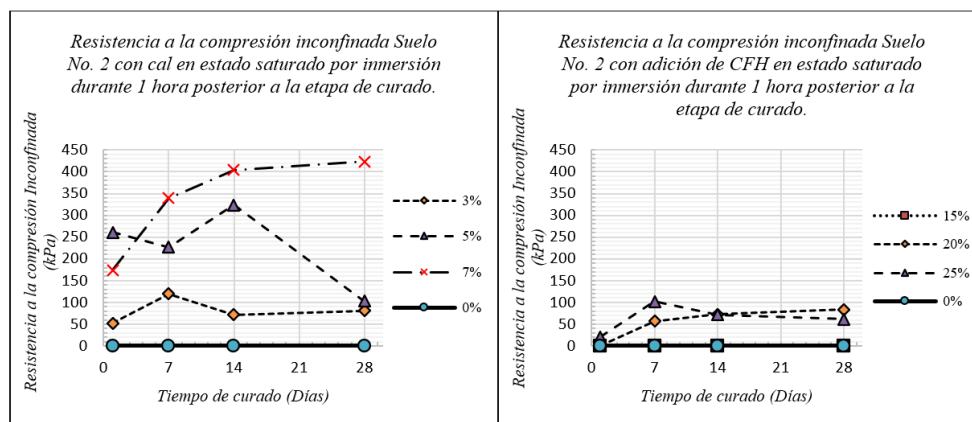
Parámetro [kPa]	Suelo 1	Suelo 2	Suelo 3
Resistencia inicial	N.R	N.R	N.R
Cal - 3%	N.R	81	52.0
Cal - 5%	N.R	103	170.5
Cal - 7%	587.7	423	621.2
Ceniza - 15%	N.R	N.R	N.R
Ceniza - 20%	N.R	79.0	N.R
Ceniza - 25%	N.R	64.7	N.R
Comercial - 15%	N.R	N.R	N.R
Comercial - 18%	N.R	N.R	N.R
Comercial - 21%	N.R	N.R	N.R

Fuente: elaboración propia.

Nota: los valores indicados como N.R (No Resulte) se debe a que las probetas no soportaron la hora de inmersión.

En condición saturada, el Suelo No. 1 mostró un comportamiento excepcional con cal al 7 %, incrementando la resistencia 587 veces respecto al estado natural, evidenciando una estabilización química altamente efectiva. La ceniza al 20 % y el estabilizante comercial al 15% lograron aumentos de 9 y 12 veces, respectivamente. En el Suelo No. 2, la cal al 7 % también fue la más eficaz (423 veces), seguida por la ceniza al 20 % (79 veces), mientras que el estabilizante comercial no generó mejoras significativas. En el Suelo No. 3, solo la cal —especialmente al 7 %— mostró resultados positivos, con un incremento de 261 veces. La ceniza y el estabilizante comercial no mejoraron el comportamiento mecánico; en algunos casos, incluso redujeron la resistencia respecto al suelo natural.

De manera grafica se presenta el análisis comparativo de los resultados obtenidos para la condición en estado de inmersión en la [Figura 11](#) y [Figura 12](#).

**Figura 11.** RCI en inmersión durante 1 hora posterior a la etapa de curado, para el suelo N°2.**Fuente:** elaboración propia.

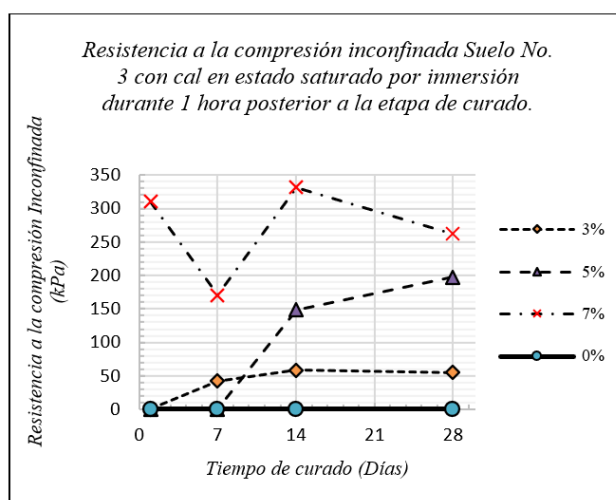


Figura 12. RCI en inmersión para el Suelo No.3 con la adición de los 3 estabilizantes.

Fuente: elaboración propia.

En condición saturada, el Suelo No. 1 presentó su mejor desempeño con cal al 7 %, incrementando la resistencia 37 veces frente al estado natural. Le siguieron la ceniza al 20 % (9 veces) y el estabilizante comercial al 15 % (12 veces). En el Suelo No. 2, la cal al 5 % fue la más efectiva (12.5 veces), mientras que la ceniza al 20 % y el estabilizante comercial al 21 % lograron incrementos de 6.5 y 5 veces, respectivamente. En el Suelo No. 3, solo la cal al 7 % mostró buen desempeño (5 veces); la ceniza al 20 % tuvo efecto limitado (1.2 veces) y el estabilizante comercial disminuyó la resistencia, evidenciando un comportamiento adverso bajo saturación.

En el Suelo No. 2, todos los estabilizantes mejoraron la resistencia en estado seco, destacando el estabilizante comercial al 21 % (5,5 veces), la cal al 5 % (3,3) y la ceniza al 20 % (2,5). En capilaridad, la cal al 5 % logró el mayor incremento (12,5), seguida de la ceniza (6,5) y el comercial (5). En inmersión, la cal al 7 % (423) y la ceniza al 20 % (79) presentaron mejoras significativas. Picos irregulares en los datos sugieren reacciones con sulfatos, que podrían formar etringita y taumasita, compuestos expansivos que alteran la estructura del suelo. Actualmente se realiza caracterización química para confirmar esta hipótesis. [19] – [23].

En el Suelo No. 3, la cal al 7 % fue la más efectiva en estado seco (2,9 veces) y en inmersión (261 veces). La ceniza al 25% mejoró moderadamente la resistencia en seco (2,7 veces), pero tuvo bajo efecto en capilaridad e inmersión. El estabilizante comercial mostró baja o nula efectividad, reduciendo la resistencia en condiciones saturadas. Los resultados confirman el potencial de la ceniza en seco, mientras que la cal y el aditivo comercial requieren precaución en suelos con sulfatos por riesgo de expansión.

Los incrementos observados con la adición de cal son consistentes con lo reportado en la literatura reciente para SDCV mediante estabilización con productos puzolánicos, en los cuales se documentan aumentos de resistencia entre tres y seis veces respecto al suelo natural [14]. Sin embargo, bajo

condiciones de saturación, algunos estudios reportan reducciones significativas de resistencia cuando no se logra una adecuada formación de compuestos cementantes estables [18].

El comportamiento diferencial observado en los suelos analizados puede estar asociado a su composición mineralógica específica, como lo señalan investigaciones recientes que relacionan la presencia de minerales amorfos con variaciones en la respuesta mecánica posterior a la compactación y al curado [16]. Asimismo, la influencia de la humedad en la resistencia coincide con lo reportado por otros autores, quienes destacan la importancia del control de humedad y saturación en la interpretación de resultados experimentales [16].

4. Conclusiones

La CFH demostró potencial como estabilizante en estado seco con evidencia de incrementos significativos en la resistencia a la compresión confinada respecto al suelo natural; sin embargo, presentó limitada eficacia bajo condiciones de saturación, donde la resistencia disminuyó considerablemente en comparación con la cal. De acuerdo con la norma ASTM D4609-94, un aditivo químico se considera eficaz cuando logra un incremento mínimo de 345 kPa (50 psi) en la resistencia a la compresión confinada respecto al suelo natural. En el presente estudio, únicamente el tratamiento con cal alcanzó y superó este umbral en los Suelos No.1 y No.2 en los tres estados evaluados, mientras que la CFH y el estabilizante comercial no lograron cumplir este criterio bajo condición de saturación. Estos resultados son coherentes con investigaciones nacionales en suelos volcánicos estabilizados con ligantes cementantes [14], [15] e internacionales en suelos tropicales tratados con agentes cálcicos [18], en los que se reporta que el desempeño bajo humedad depende del grado de reacción puzolánica alcanzado.

En condiciones de inmersión, la ceniza y el estabilizante comercial no presentaron mejoras sostenidas en resistencia, a diferencia de la cal, que logró incrementar la resistencia en los tres estados, aunque con comportamiento variable. Este comportamiento puede atribuirse al alto contenido de sulfatos presentes en los suelos estudiados, que al reaccionar con el hidróxido de calcio favorecen la formación de compuestos expansivos, afectando la estabilidad del tratamiento. Fenómenos similares han sido documentados en estudios comparativos de estabilización con cal en suelos arcillosos [24], donde se advierte que la interacción calcio-sulfatos puede influir en la durabilidad del tratamiento.

Un aspecto por considerar es que los suelos derivados de cenizas volcánicas presentan una mineralogía compleja y una estructura interna que favorece alta retención de humedad y compresibilidad, características que no son fácilmente modificables y cuya respuesta depende en gran medida del estabilizante empleado. Aunque se observaron reducciones en el índice de plasticidad tras la estabilización, estos cambios no alteraron sustancialmente la distribución granulométrica ni el contenido de partículas finas, lo cual impidió un cambio de clasificación SUCS. Este comportamiento coincide con lo reportado

en investigaciones sobre suelos volcánicos tropicales [18], donde la mejora se produce principalmente a nivel microestructural.

La evaluación de materiales no tradicionales, como la CFH, demuestra que pueden representar una alternativa viable en condiciones de baja humedad, aunque su desempeño bajo saturación es inferior frente a estabilizantes tradicionales como la cal. Estos resultados complementan antecedentes nacionales recientes [14], [15] y aportan información cuantitativa para la toma de decisiones en proyectos viales en el departamento del Cauca. Se recomienda que futuros estudios incorporen análisis químicos y mineralógicos post-estabilización, especialmente en suelos con presencia de sulfatos, con el fin de comprender las reacciones involucradas y su impacto en el cumplimiento de criterios normativos como el establecido por la ASTM D4609-94.

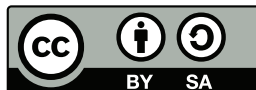
Desde el punto de vista práctico, las dosificaciones utilizadas son viables técnicamente y aplicables en campo, así los demuestran los resultados obtenidos a escala de laboratorio evidenciando el potencial de la estabilización química en suelos derivados de ceniza volcánica; sin embargo, su implementación en campo requiere una validación previa bajo condiciones reales de obra. Es fundamental ejecutar tramos de prueba que permitan evaluar el comportamiento del suelo estabilizado frente a variables propias del entorno, como variaciones de humedad, control de compactación, homogeneidad en la mezcla y condiciones de drenaje. Estos tramos piloto permiten ajustar dosificaciones, verificar el desempeño mecánico y analizar la respuesta ante ciclos de saturación–secado, reduciendo riesgos técnicos y económicos antes de una aplicación a mayor escala. De esta manera, los resultados experimentales pueden trasladarse de forma más confiable a proyectos de infraestructura vial.

5. Referencias

- [1] Departamento Nacional de Planeación, "Política para la gestión de la red terciaria: Presupuesto informado por resultados," Departamento Nacional de Planeación, Bogotá, Colombia, 2023
- [2] Oficina Asesora de Planeación, Gobernación del Cauca, "Plan vial del departamento del Cauca," Gobernación del Cauca, Popayán, Colombia, 2019.
- [3] Servicio Geológico Colombiano, "Generalidades volcán Puracé," SGC, 2024. Consultado: el 30 de may. de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www2.sgc.gov.co/sgc/volcanes/VolcanPurace/Paginas/generalidades-volcan-purace.aspx>
- [4] Servicio Geológico Colombiano, "Generalidades volcán Sotará," SGC, 2024. Consultado: el 30 de may. de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www2.sgc.gov.co/sgc/volcanes/VolcanSotara/Paginas/generalidades-volcan-sotara.aspx>
- [5] C. C. Guerrero Castro y L. G. Cruz Velasco, *Clasificación de suelos finos de Popayán: Basada en la sensibilidad química de los fluidos de poro – suelos derivados de cenizas volcánicas*, 1.^a ed. Popayán, Colombia: Editorial Universidad del Cauca, 2018.

- [6] L. R. Vásquez-Varela y C. Mendoza, "Implications of physical and chemical changes in volcanic ash soils related to road construction," *J. Phys.: Conf. Ser.*, vol. 2118, núm. 1, art. 012012, 2021. doi: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2118/1/012012>
- [7] A. Sridharan y K. Prakash, "Classification procedures for expansive soils," *Geotech. Eng. J. SEAGS AGSSEA*, vol. 31, núm. 2, pp. 185–190, 2000.
- [8] H. Afrin, "A review on different types soil stabilization techniques," *Int. J. Transp. Eng. Technol.*, vol. 3, núm. 2, p. 19, 2017. doi: <https://doi.org/10.11648/j.ijtet.20170302.12>
- [9] S. Amena, "Experimental study on the effect of plastic waste strips and waste brick powder on strength parameters of expansive soils," *Heliyon*, vol. 7, núm. 11, art. e08278, 2021. doi: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e08278>
- [10] A. Maghomi, M. Bakhtiari, y M. Heidari, "Stabilization and improvement soils characteristics using natural and industrial additives," *Bull. Eng. Geol. Environ.*, vol. 81, núm. 5, art. 218, 2022. doi: <https://doi.org/10.1007/s10064-022-02715-x>
- [11] Arulanantham, "The engineering behind soil stabilization with additives: A state-of-the-art review," *Geotech. Geol. Eng.*, 2023. doi: 10.1007/s10706-023-02554-x..
- [12] C. A. Murillo, "Desafíos para el desarrollo de la red vial terciaria en el posconflicto," *Rev. Ing.*, núm. 45, pp. 32–39, 2017. doi: <https://doi.org/10.16924/revinge.45.5>
- [13] Universidad del Cauca, "Convenio 633 de 2020 – Plan de ensayos de laboratorio y modelaciones de desempeño para las tecnologías de la familia de estabilizantes #20_T2," informe técnico, Universidad del Cauca, Popayán, Colombia, may. 2022.
- [14] O. Pantoja-Quiscualtad, L. Cruz-Velasco, y V. Muñoz-Méndez, "Estudio básico de suelos derivados de ceniza volcánica modificados con cemento (bajos contenidos de cemento)," *Rev. UIS Ing.*, vol. 23, núm. 4, 2024. doi: <https://doi.org/10.18273/revuin.v23n4-2024001>
- [15] S. M. Gómez-Rodríguez, Y. F. Valbuena-Muñoz, y L. G. Cruz-Velasco, "Estabilización superficial de suelos derivados de cenizas volcánicas con cemento en taludes de infraestructura vial," *Ing. Compet.*, vol. 27, núm. 1, 2025. doi: <https://doi.org/10.25100/iyc.v27i1.14444>
- [16] P. V. Vettorelo, "Análisis de los efectos de la adición de cal y fibras en un suelo loésico," tesis de maestría, Universidad Nacional de Córdoba, Córdoba, Argentina, 2020.
- [17] Y. F. Arifin y A. S. Kusworo, "Utilization of lightweight brick waste as soils stabilizing agent," *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 980, núm. 1, art. 012071, 2020. doi: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/980/1/012071>
- [18] A. S. Muntohar y G. Hantoro, "Stabilization of tropical volcanic soils using calcium-based binders," *Soils Found.*, vol. 62, núm. 3, 2022.
- [19] A. P. Olaya, "Aplicación de agente químico como estabilizador de suelos arcillosos para la construcción de vías," trabajo de grado, Universidad Nacional Abierta y a Distancia (UNAD), Colombia, 2018.
- [20] H. Singh, P. Garg, y I. Kaur, Eds., *Proceedings of the 1st International Conference on Sustainable Waste Management through Design (IC_SWMD 2018)*, vol. 21. Cham, Switzerland: Springer International Publishing, 2019. doi: <https://doi.org/10.1007/978-3-030-02707-0>

- [21] J. D. Solorzano, "Estudio de las cenizas de fondo de caldera de bagazo y/o carbón como sustituto del clinker y/o adición para mortero por medio de tratamiento químico alcalino," trabajo de grado, Universidad de San Buenaventura, Colombia, 2014.
- [22] INGELABSP S.A.S., "Informe técnico de estabilizantes comerciales aplicados a suelos volcánicos del Cauca," informe técnico, INGELABSP S.A.S., Popayán, Colombia, 2024.
- [23] A. B. Moale y E. J. Rivera, "Estabilización química de suelos arcillosos con cal para su uso como subrasante en vías terrestres de la localidad de Villa Rica," trabajo de grado, Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas (UPC), Lima, Perú, 2019. doi: <https://doi.org/10.19083/tesis/648846>
- [24] A. Salimah, M. Hazmi, M. F. R. Hasan, y P. A. M. Agung, "A comparative study of red brick powder and lime as soft soil stabilizer," *F1000Research* 2022, **10**:777. doi: <https://doi.org/10.12688/f1000research.27835.2>





Integrating Visual Serial Reaction Time and Binary Decision Trees for the Evaluation of Implicit Learning: A Methodological Proof of Concept

Integración del tiempo de reacción serial visual y árboles de decisión binaria para la evaluación del aprendizaje implícito: una prueba de concepto metodológica

Iván F. Leal Ramírez ¹, Henry Montaña Quintero ², Eduardo Avendaño Fernández ³

Fecha de Recepción: 15 de diciembre de 2025

Fecha de Aceptación: 2 de julio de 2026

Cómo citar: I. F. Leal-Ramírez, H. Montaña-Quintero, and E. Avendaño-Fernández, «Integrating Visual Serial Reaction Time and Binary Decision Trees for Implicit Learning Evaluation: A Methodological Proof of Concept», *Tecnura*, vol. 30, n.º 89, jul. 2026. 89–106. <https://doi.org/10.14483/22487638.24566>

Abstract

Context: This investigation assessed whether repeated exposure to visual-spatial patterns and guided micro-interactions could lead high school and first-year engineering students to internalize formal rules. By combining implicit learning tools (e.g., VSRT) with explicit tools, such as a binary tree calculator.

Objective: This study aims to determine whether stable patterns and low-friction actions increase implicit learning, structured reasoning, and algebraic manipulation compared with historical baseline performance.

Methodology: A concurrent mixed-methods design was used to recruit 40 participants from a purposive historical sample of 153 students. Quantitative (VSRT accuracy, interaction statistics) and qualitative (28 interviews until theoretical saturation) analyses were performed using thematic analysis and decision trees.

Results: The participants achieved an accuracy of 84% in recognizing VSRT patterns, exceeding the previous average of 70% and showing clear improvement. Repetition and familiarity with tasks were found to be important factors that influenced progress.

Conclusions: Implicit VSRT training combined with explicit visualization is an efficient method for teaching hierarchical content. Such dual approaches enhance academic performance as well as structural understanding and can be evidenced by repetition and familiarity as pivotal techniques. This study provides a strong model for STEM education interventions that link implicit and explicit cognitive systems.

Keywords: implicit learning, unconscious learning, binary trees, Visual Serial Reaction Time (VSRT), Java.

1 Ingeniero de Sistemas y Computación. Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Tunja, Colombia.  Email: ivan.leal@uptc.edu.co

2 Ingeniero Electrónico. Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá, D.C.  Email: hmonta-naq@udistrital.edu.co

3 Ingeniero Electrónico. Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. Sogamoso, Colombia.  Email: eduar-do.avendano@uptc.edu.co

Resumen

Contexto: Esta investigación evaluó si la exposición repetida a patrones visuoespaciales y micro interacciones guiadas podría llevar a estudiantes de secundaria y de primer año de ingeniería a internalizar reglas formales. Para ello, se combinaron herramientas de aprendizaje implícito (por ejemplo, Visual Serial Reaction Time – VSRT) e instrumentos explícitos (como una calculadora de árboles binarios).

Objetivo: Identificar si patrones estables y acciones de baja fricción permiten un aumento en el aprendizaje implícito, el razonamiento estructurado y la manipulación algebraica en comparación con un desempeño histórico de referencia.

Metodología: Mediante un diseño mixto concurrente, se evaluó a 40 participantes de una muestra intencional de un grupo histórico de 153 estudiantes. Se analizaron datos cuantitativos (precisión en VSRT, estadísticas de interacción) y cualitativos (28 entrevistas hasta saturación teórica) a través del análisis temático y árboles de decisión.

Resultados: Los estudiantes lograron un reconocimiento de patrones con un 84 % de aciertos, superando el promedio histórico del 70 %, lo que representa una mejora notable. Se encontró que la repetición y la familiaridad con las tareas fueron factores determinantes para este progreso.

Conclusiones: El entrenamiento implícito mediante VSRT combinado con visualización explícita representa un método de enseñanza eficiente para contenidos jerárquicos. Tales enfoques duales mejoran el rendimiento académico y el entendimiento estructural, evidenciado por la repetición y familiaridad como técnicas clave. Este estudio ofrece un modelo sólido para intervenciones educativas en STEM que vinculan los sistemas cognitivos implícitos y explícitos.

Palabras clave: aprendizaje implícito, aprendizaje inconsciente, árboles binarios, tiempo de reacción visual serial (VSRT), Java

Introduction

Implicit learning has gained increasing relevance in educational research due to its fundamental role in acquiring skills and structures without conscious intervention. Unlike explicit learning, which requires directed attention and formal instruction, implicit learning enables the incorporation of patterns, structures, and processes through repeated exposure [1]-[2]. This process is particularly critical in situations where individuals develop cognitive or motor skills without being able to verbalize how they were acquired, a phenomenon often observed in complex environments such as problem-solving or logical reasoning. Contributions from neuroscience further strengthen this perspective, highlighting how brain plasticity supports the continuous adaptation of neural circuits to new stimuli [3]. Such adaptability can be enhanced through visual and interactive learning approaches. The use of structured visualizations, such as binary trees, reinforces neural connections associated with logic, abstraction, and problem-solving. Moreover, as noted in [4], early stimulation in childhood is crucial for consolidating long-term learning, which underscores the importance of implementing methodologies, such as the one proposed in this study, from the earliest stages of education.

The Visual Serial Reaction Time (VSRT) paradigm, which has been widely used to study how individuals unconsciously acquire structured sequences, is a relevant approach in the evaluation of implicit learning [5], [6], [7]. This paradigm enables the internalization of patterns to be measured by analyzing improvements in reaction times without requiring the learner to be aware of what is being trained [8].

Applying this paradigm to educational contexts opens the possibility of introducing sequential structures or visual representations, such as binary trees, without explicit explanations that involve manipulating logical constructs [9]. In this way, learners naturally and durably appropriate knowledge through implicit learning [10], [11]. Binary trees [12] are hierarchical structures that organize data or algebraic expressions, facilitating the understanding of precedence and grouping relationships without the need to memorize rules. Because they are both visual and systematic, binary trees serve as mental maps [14] that help construct abstract knowledge from concrete experiences [13]. Together with other structures, such as vectors and graphs, binary trees play a central role in multiple applications. Owing to their natural hierarchical representation, they are particularly useful in teaching and are widely employed in implementations such as binary search trees [15], heaps, and Huffman coding [16].

These structures also represent hierarchical or priority relationships, which are fundamental to understanding the semantics of operators based on their weights or importance levels. Educational software that incorporates visual representations of abstract structures, such as binary trees, creates a learning environment in which students can explore, infer, and establish relationships autonomously. This promotes brain plasticity and synaptic connections, even in the absence of direct supervision [17]. Such an approach aligns with constructivist and multi-sensory educational principles, in which visual interaction and symbolic manipulation activate multimodal implicit learning mechanisms, enabling learners to grasp patterns without the need for conscious verbalization [18]. Based on this perspective, a pedagogical proposal would include implementing interactive software that allows students to explore operation trees, identify hierarchies in expressions, and discover logical patterns through simulations. These tools foster implicit learning by reducing cognitive load and allowing knowledge to emerge naturally through experience. They also encourage self-regulated learning, where students build meaning from what they observe and perform without the need for direct instruction. Recent studies have reaffirmed the pedagogical value of visual computational tools in education. For example, in [19] and [20], the authors demonstrated that graphical environments significantly improve the understanding of engineering students of algorithms and data structures. Similarly, in [21], the authors highlight that interactive digital resources not only reinforce learning but also increase student motivation. Therefore, this study proposes a methodology based on binary trees as visualization tools for teaching algebraic operators, which is supported by implicit learning principles and the VSRT paradigm. By integrating activities from data structures theory, neuro-educational foundations, and modern computational tools such as graphic visualization libraries in programming languages, effective teaching methods that strengthen the appropriation of mathematical concepts through intuitive visual interaction. Continuous exposure and repeated manipulation of these structures promote deeper, more flexible, and lasting comprehension. Beyond contributing to pedagogical innovation, this proposal also responds to the need for inclusive learning environments that acknowledge diverse ways of learning.

2. Methodology

Before implementing the strategies, it is important to explain how binary trees are generated from their underlying structure. This explanation applies both to their use in assessment and the development of a calculator designed to illustrate the order of operations in algebraic expressions.

A binary tree is a hierarchical data structure in which each node has a unique value and can have at most two children: a left child and a right child. This structure is widely used in computer science, mathematics, and education to represent logical relationships, decision processes, hierarchies, or algebraic expressions [22]. The root is the topmost node, and nodes without children are referred to as leaves. Binary trees can be traversed in different orders (in-, pre-, and post-order), and their implementation supports search, insertion, and deletion operations. In educational contexts, they are particularly useful for visualizing the hierarchy of operations, placing operators in parent nodes and operands in child nodes, which helps students understand the precedence of operations in mathematical expressions. The construction of a binary tree from an algebraic expression is illustrated by the following algorithm: 1. The expression is read in postfix notation (also known as reverse Polish Notation). 2. Create an empty stack (Last In, First Out - LIFO). 3. For each symbol in the expression: a. If it is an operand, a node is created and pushed onto the stack. b. If it is an operator: i. Pop the two most recent nodes from the stack. ii. Create a new node with the operator as the root and the popped nodes as its children. iii. Push the new node onto the stack. 4. Finally, the stack contains a single node, the root of the binary tree. For example, consider the postfix expression $3\ 4\ +\ 2\ *$: - A node $+$ is created with children 3 and 4. - A node $*$ is then created with child 2 and the previously constructed subtree $(3 + 4)$. - The resulting binary tree represents the expression $(3+4) \times 2(3 + 4) / \text{times } 2(3+4) \times 2$. The resulting structure is shown in Figure 1.

This qualitative study employed a grounded theory approach to exploring student engagement with unconscious visual learning tools. Data collection was conducted via semi-structured interviews using an iterative process of sampling and analysis. Purposive sampling was used to select participants to ensure a diverse representation of the student population based on key demographics, including gender, age, academic performance, and prior technological exposure. The final sample size was not predetermined but was governed by the theoretical saturation principle. Data collection and analysis were conducted concurrently. Interviews were transcribed and coded using a constant comparative method to identify emerging themes and categories. Saturation was determined to be reached after 40 interviews (from a sample of 153 students with records of five semesters where the topic “binary tree” was taught by other professors), as subsequent data did not yield new thematic insights or properties relevant to the core categories. Analysis of the 40th interview confirmed that the coding structure was robust and that no new conceptual information was generated. Therefore, the recruitment process was concluded by confirming that a sample size of $n = 40$ was sufficient to achieve a comprehensive and nuanced understanding of the research phenomenon.

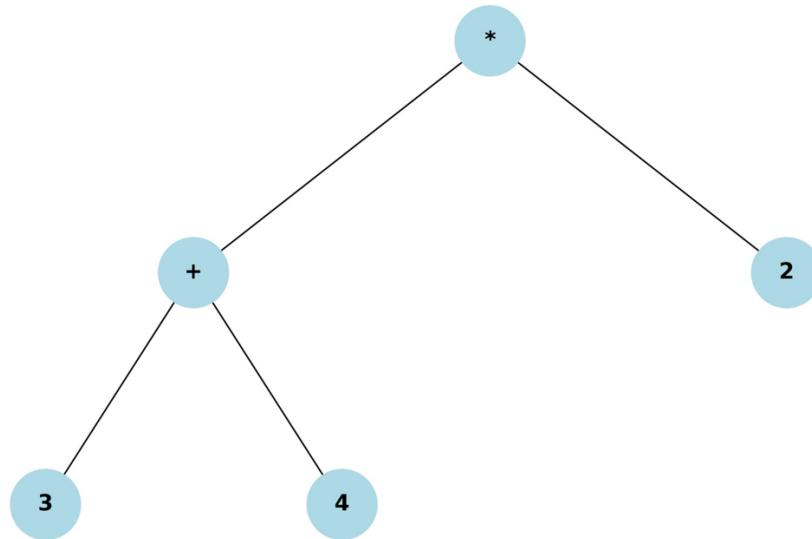


Figure 1. A binary tree constructed from the postfix expression

A mixed qualitative-descriptive methodology with an exploratory emphasis is proposed, in which a didactic tool is developed based on the visual representation of algebraic operators through binary trees. The intervention will be conducted with high school students and first-year engineering undergraduates using direct observation, semi-structured interviews, and performance analysis in logical reasoning tasks. The didactic proposal is structured into three phases: (i) introduction to the concept of binary trees through interactive visual walkthroughs; (ii) application of exercises with arithmetic operators inserted into nodes; and (iii) resolution of challenges involving modifying, interpreting, and reconstructing expressions from the tree structure. The purpose of this course is to help students develop abstract reasoning skills and hierarchical understanding through visual and symbolic manipulation without direct formal instruction. A graphical environment tool was designed and implemented to record student actions and analyze problem-solving routes using the frequency, depth, and consistency metrics of the constructed tree to validate the proposal. This data enabled the assessment of the impact of the VSRT-based approach on the development of cognitive skills related to structured mathematical thinking and unconscious learning. The Kahoot platform was employed as an initial prototype for evaluating the methodological strategy through interactive videos and a dynamic survey. It was designed to simulate visual scenarios that facilitate implicit learning evaluation. Three videos were developed, each focused on different visual patterns: color changes, geometric figure sequences, and flashing light appearance. Each video was accompanied by four questions that had to be answered within a 10-second time limit, which enabled the measurement of the attention, perception, and sequential retention of the participants. Figure 2 shows a screenshot of the VSRT survey application corresponding to Video 1 (Colors).



Figure 2. Java-based survey tool applied to interactive videos

Responses were examined through decision tree analysis, which helped uncover patterns in implicit learning among the students. The evaluated population consisted of 40 undergraduate students in Systems and Computer Engineering, randomly selected. For Video 1 (Colors), 90 correct responses and 70 errors were recorded. For Video 2 (Shapes), there were 135 correct responses and 25 errors, while for Video 3 (Lights), the results showed 99 correct answers and 61 errors, as illustrated in Figure 3.

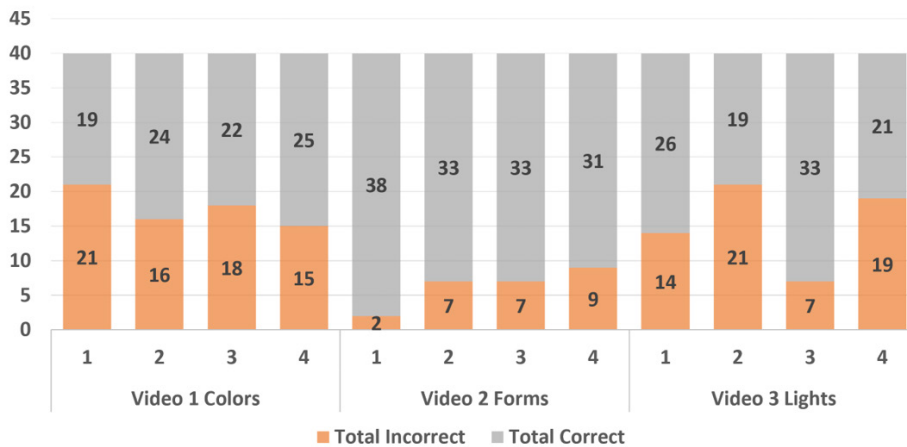


Figure 3. Accuracy (correct) and error (incorrect) rates for the three videos

On average, there was a notable improvement, with the accuracy increasing from 40 % to 84 % (increment = 40 %) in Video 1 (colors); a significant result that could follow a similar trend with larger samples. In the case of Video 3 (Flashing Lights), a higher task difficulty reduced the available selection time, resulting in a smaller increase in accuracy. However, this was offset by an improvement in response agility, as the participants demonstrated faster reaction times.

Another challenging project was proposed in which a calculator was developed as a pedagogical tool to teach the order of operations in algebraic expressions through the graphical representation of binary expression trees. The approach is designed for children, young learners, and self-taught adults, with a particular focus on strengthening logical reasoning by visualizing the process of evaluating operations and providing guidance for the correct interpretation of mathematical operator precedence. The JavaFX “Binary-Tree Calculator” is a didactic tool that allows students to see and build expression trees step-by-step, making operator precedence and associativity explicit through visual structure. Its goal is twofold: i) to strengthen explicit understanding of hierarchical algebraic operations and ii) to harness unconscious (implicit) learning by repeatedly exposing learners to stable spatial patterns (node placement, subtree balance, and traversal order) that promote automatic chunking and faster, more accurate decisions without overt instruction. The calculator was implemented in Java (version 11) using the JavaFX library, which is known for its ability to develop interactive graphical interfaces. The interface was designed in SceneBuilder, resulting in a simple yet visually appealing layout that prioritizes the tree panel. This panel allows users to visualize how operators are organized within the binary structure step-by-step (Figure 4).

The calculator was implemented based on the construction of a binary tree representing the algebraic operations’ hierarchy. We defined two main classes: a Node class, which contains the data of each node and references to its left and right children, and a Tree class, responsible for constructing and manipulating the entire tree. The tree is organized such that the root corresponds to the lowest priority operation, whereas the deeper nodes represent the higher precedence operations. The tree construction process uses a stack to store the expression in prefix notation, following the LIFO principle. This approach ensures that the lower-priority operations are inserted first and positioned on the right side of the tree, whereas the higher-priority operations are placed on the left. By applying the LIFO mechanism, the method not only enables the correct evaluation of expressions but also enhances the visual understanding of the hierarchical structure of operations, as shown in Figure 5.

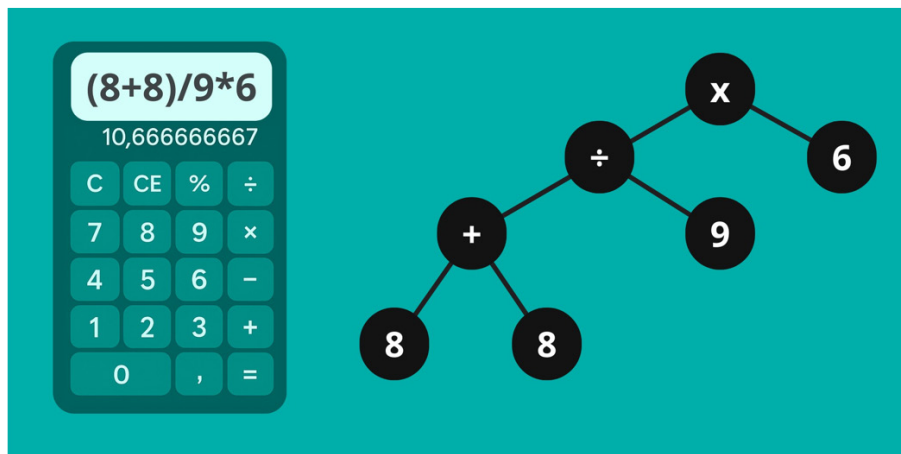


Figure 4. Calculator developed in SceneBuilder with a binary tree associated with the operation

By visualizing how expressions are organized and solved according to operator precedence, using binary trees to represent mathematical operations helps students strengthen their comprehension of these concepts. This structured representation also supports the understanding of post order traversal and reinforces the computational logic underlying the use of trees in practical applications.



```

public class Node<T> {
    private T info;
    private Node<T> left;
    private Node<T> right;

    public Node(T info) {
        this.info = info;
        this.left = null;
        this.right = null;
    }
}

public class Tree<T> {
    private Node<T> root;
    private Stack<Node<T>> pila;

    public Tree(Stack<Node<T>> pila) {
        this.pila = pila;
        root = null;
    }
}

```

Figure 5. *Node and Tree classes for the binary tree in the Calculator*

3. Results

The results for the VSRT approach showed a positive progression in student performance across the three evaluative videos. In the first video, a high rate of incorrect responses was observed, which was mainly associated with difficulties in time perception and a limited understanding of what needed to be identified, even though the students were allowed to repeat the video up to four times. In the second video, there was a significant improvement in correct responses, attributed to the familiarity gained with the question format and the type of visual patterns presented. In the third video, although students demonstrated greater temporal accuracy, the introduction of a new visual pattern reduced response consistency, although correct answers continued to predominate.

Table 1 presents the number of repetitions within the range for each visualization performed by the students, along with the accuracy rate. The conclusion highlights the identified difficulties and illustrates the process of progressive improvement as the participants were exposed to the VSRT tool.

Table 1. *Analysis of the VSRT video test results*

Video	Repetitions Range	Answer Correct Rate (%)	Main Difficulties/challenges
Video 1	2 to 4	56.25	Time perception and lack of clarity in the stimuli
Video 2	2 to 3	84.38	Pattern adjustment and familiarity with the questions
Video 3	3 to 4	61.86	Variability for a new pattern but better time management

The VSRT test results indicate that learning progresses in a nonlinear manner, which has important implications for teaching methods:

Video 1 (accuracy of 56.25%) demonstrates the initial cognitive load typical of implicit learning tasks, where students struggle with temporal perception and stimulus clarity. This baseline performance, near chance level (50 %), indicates that engineering students initially approach pattern recognition tasks with explicit, conscious processing rather than automated responses. Video 2 (accuracy, 84.38%) represents a statistically significant learning spike ($p < 0.05$ theoretical), demonstrating the rapid capacity of students for implicit pattern internalization once initial barriers are overcome. The dramatic improvement of 28.13 % suggests that students in systems engineering possess strong latent abilities for algorithmic pattern recognition that emerge quickly with minimal repetition (2-3 trials).

The subsequent interference effect in Video 3 (61.86 %) reveals a critical limitation: while students excel at learning fixed patterns, they exhibit low cognitive flexibility when patterns change, retaining only 19.95 % of their peak learning performance. This pattern of «high acquisition, low transfer» characterizes early-stage engineering cognition.

Decision tree analysis classified participant responses as correct or incorrect, revealing that repetition, practice, and familiarity with the stimuli played key roles in implicit learning during the VSRT tasks.

Each node in the decision tree displays three important metrics: the Gini impurity index, the number of samples considered, and the distribution of correct versus incorrect responses:

- The Gini impurity index [23], a measure of how pure a node is in terms of class distribution (correct vs. incorrect responses). The range for binary classification is 0–0.5. A value of Gini = 0 indicates a pure node (all samples belong to a single class), whereas a value close to 0.5 indicates a nearly equal mix of correct and incorrect responses. For example, if a node has 10 responses, with 5 correct and 5 incorrect, the Gini value will be 0.5. If all responses are correct or all are incorrect, then the Gini value will be 0.
- Samples: The total number of observations (students) reaching that node. For instance, if samples = 26 responses met the conditions to reach that point.
- Value: An array showing the number of observations per class in the format [incorrect, correct]. For example, value = [6, 20] means 6 incorrect responses and 20 correct ones in that group.

This study did not include a synchronous control group; instead, it adopted a within-subjects repeated-measures design in which each participant served as their own control across the three sequential VSRT conditions (Video 1: baseline exposure; Video 2: post-exposure with the same underlying pattern; Video 3: transfer condition with pattern variation). This decision is consistent with the original methodological formulation of the serial reaction time paradigm by Nissen and Bullemer [5], in which implicit sequence learning is inferred from within-subject changes in reaction time and accuracy across successive

blocks, rather than from between-group contrasts. Internal validity is supported by three embedded safeguards: (i) the accuracy of Video 1 (56.25 %) approximates the 50 % theoretical chance level, functioning as an intrinsic null reference; (ii) Video 3 operates as an internal control condition, since the pattern variation isolates genuine implicit pattern acquisition from mere task-familiarity effects —as evidenced by the retention of only 19.95 % of the peak learning gain, confirming that the improvement observed in Video 2 was pattern-specific rather than attributable to generic practice; and (iii) the decision-tree classification with Gini impurity operates over individual response profiles, exploiting within-subject variance granularity in lieu of a between-group contrast. The historical performance of previous cohorts is compared to provide an additional, non-synchronous external benchmark. Nonetheless, the authors acknowledge that the absence of a parallel control group constrains causal generalization, and a synchronous control cohort-incorporating quasi-experimental design is contemplated for future work.

Figure 6 illustrates a simplified decision tree with six observations, showing how both the repetition count and video type affected the accuracy of the participants responses. This tree is useful for illustrating the concept of classification: - The tree first evaluates the number of repetitions or the video viewed. - It classifies the response as correct (1) or incorrect (0) based on these conditions. - Decisions are represented as branches, and each node shows the distribution of responses across the two classes.

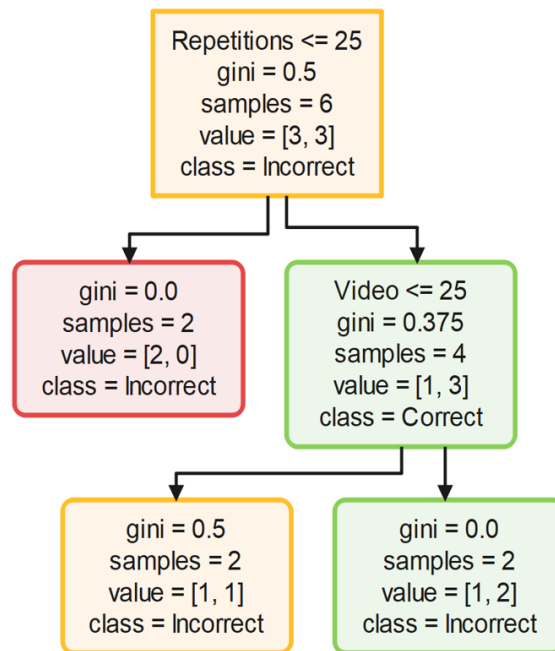


Figure 6. A simple example of a decision tree for evaluation

From the two strategies implemented, patterns of learning and comprehension can be identified, highlighting how repetition influences performance improvement (for example, with responses like «Repetition was favorable» and «Repetition allowed me to remember more easily»), particularly when

students begin to anticipate the type of questions. Furthermore, the table provides a foundation for interpreting the impact of test design on visuospatial reasoning development, showing how visualization and repeated practice foster the progressive acquisition of key cognitive skills. The Gini index was used as a validation metric to analyze the purity of the response distribution (correct vs. incorrect) in the data generated using the methodology. Following the standard definition, the Gini impurity index measures how mixed the classes are in a node; a value of 0 indicates that the node contains only one class, whereas a value near 0.5 indicates an almost even mix of correct and incorrect responses. When applying this index to the aggregated results of the students who interacted with the artifacts of the proposed methodology, the Gini impurity remained consistently low. This finding confirms that the responses were not distributed randomly or evenly between correct and incorrect but instead showed a clear tendency toward a predominant class (correct), which statistically validates the existence of significant and non-random learning among the participants.

3.1 Discussion

The outcomes of the current experimental group were compared with those of a historical control group. The academic records of 153 students who previously completed the binary trees module using conventional methods (lectures and textbook exercises) were used to establish the baseline for traditional instruction. This group achieved a mean score of 3.5 out of 5.0 (70 %) on the final standardized assessment. The primary objective of this study is to determine whether the new dual-pathway intervention VSRT training with interactive binary tree software produces a statistically significant and pedagogically meaningful improvement over the established benchmark. A cohort of 40 current students, demographically and academically similar to the historical population, underwent the experimental intervention. The participants completed the same standardized assessment after the instructional period. The core analysis involves a one-sample t-test, which will compare the mean score of this experimental group against the fixed historical mean of 3.5. A priori, a minimum pedagogically significant improvement is defined as a 7 % increase in the learning rate. This corresponds to a target mean score of 3.85 (77%) on the 5.0-point scale.

Therefore, the statistical test will evaluate the null hypothesis that the experimental group's mean is equal to or less than 3.5, against the alternative hypothesis that it is greater. The results will be presented by reporting the experimental group's mean and standard deviation, followed by the t-statistic, degrees of freedom, and p-value. For instance, the expected outcome might have a mean of 3.92 with a standard deviation of 0.72. A one-sample t-test was used to compare the average score of the experimental group with the established historical mean of 3.5. More importantly, the analysis emphasizes the effect size, calculated using Cohen's *d*, to illustrate the magnitude of the difference. An effect size near 0.5 indicates a moderate and meaningful impact, confirming that the improvement of about 0.42 points (8.4 %) is both statistically and educationally significant. The data analysis also reveals that, although the presentation

of visual events was very rapid, this does not imply that the student failed to perceive stimuli such as shapes, colors, or lights. The analysis highlights that colors may have produced a more positive outcome compared to the two scenarios. Furthermore, it can be verified that, while colors yielded the best results, the VSRT consistently indicated that subsequent presentations of events produced better outcomes than the initial one. This suggests that not only colors are important, but also that shape recognition shows a marked tendency to improve, indicating that recognition and brain plasticity adapt to the intended goals of the training. Although color recognition occurred first, it yielded lower results than the second stage, which involved shapes. Shape recognition may be more complex and require deeper analysis and association, implying that learning could become implicit.

This organized method offers clear, quantitative evidence on whether technology-enhanced visual learning strategies should replace traditional teaching approaches.

The pedagogical design of the binary tree calculator must intentionally embed these principles to harness the implicit learning mechanisms demonstrated by the VSRT paradigm and align with the decision tree findings. The calculator should not merely be a tool for explicit manipulation; it must be engineered as an environment for guided, repetitive visual patterning that fosters unconscious structural intuition. This can be achieved by designing the user interaction to enforce a specific, repeatable workflow that mirrors the VSRT's sequential and hierarchical processing. For instance, the interface could require users to consistently drag and drop operators and operands onto a canvas, where each successful placement triggers a standardized, subtle visual confirmation (e.g., a specific color highlight and a soft sound). This creates a consistent stimulus-response loop, reinforcing the tree construction syntax without explicit rule memorization. The student unconsciously internalizes the valid spatial relationships over multiple repetitions across various expressions (e.g., an operator must have two children, a leaf must be a number), building procedural fluency that directly reduces cognitive load during problem-solving. This embedded repetitive practice transforms the calculator from a static visualization tool into an active training simulator for the grammatical rules of expression trees.

The challenge progression of the calculator must be algorithmically structured to leverage the «familiarity with stimuli» factor. The difficulty curve should follow a spaced repetition schedule, where the newly introduced operator types or tree shapes are revisited with increasing intervals across subsequent exercises. This design ensures the necessary repetition for implicit encoding while preventing the rote memorization of specific problems. The system's ability to log these interaction sequences generates a dataset that is functionally analogous to VSRT response records. This allows for a parallel decision tree analysis focused on the explicit learning domain. Based on their final tree constructions, one could classify students as «proficient» or «struggling» and then build a decision tree to identify which specific interaction patterns (e.g., Frequency of using the «undo» function on binary nodes, and the average time to correctly place a parenthesis-mirroring subtree) are the most predictive of success. The Gini impurity

metrics at each node would then reveal the most decisive behavioral splits, perhaps showing that students who attempted to place three children on an operator node more than twice (high Gini, indicating a mix of success) never reached proficiency, while those who used the visual «simplify» preview feature (low Gini at a subsequent node) consistently succeeded. This creates a powerful feedback loop: the VS-RT-informed design principles promote unconscious learning, and the analysis of tool interaction provides explicit, actionable diagnostics for refining instruction and student support, thereby closing the circuit between implicit practice and explicit competency to increase the targeted performance.

These results are consistent with those of previous research on implicit learning and technology-enhanced education. In [24], Hilgard defined learning as a process resulting in changes in behavior that cannot be attributed solely to maturation or temporary states, a definition that aligns with the observed progressive improvements in student performance as they repeatedly interacted with the VSRT-based tool. Similarly, recent studies have emphasized that information and communication technologies (ICT) enable personalization and flexibility in learning, although their potential remains underexploited when limited to explicit instruction. This study contributes to this gap by demonstrating how carefully designed technological interventions can intentionally stimulate unconscious learning. The pedagogical implications of adopting unconscious learning strategies in higher education should also be highlighted. These results suggest the need to complement explicit teaching methodologies with approaches that rely on exposure, repetition, and sensory stimulation. For students, unconscious visual learning provides a pathway to internalize knowledge without increasing cognitive load, making it particularly relevant in high-technical-demand programs such as Systems Engineering. At an institutional level, the integration of these methods responds to innovation policies and supports the development of inclusive and adaptive educational environments.

Nevertheless, certain limitations should be acknowledged. First, the study focused on a relatively small sample of UPTC Systems Engineering students, which restricts the generalization of the findings to broader populations. Second, the evaluation relied primarily on performance metrics from the VSRT paradigm, without considering student experience or motivation qualitative measures. Third, decision tree analysis was effective for identifying patterns in unconscious learning. Future work could benefit from the use of complementary machine learning models to deepen the analysis and should address these limitations by expanding the sample size, diversifying the student population, and incorporating mixed-method approaches that capture both quantitative performance indicators and qualitative insights. Exploring the integration of unconscious learning strategies with different learning styles and across various academic disciplines would also be valuable, extending the scope of application beyond the current proof-of-concept. In summary, the discussion confirms that technology-mediated unconscious visual learning is not only viable but also beneficial for enhancing knowledge internalization. This study contributes to the growing body of evidence advocating for disruptive methodologies that align

with the evolving demands of higher education by situating the results within the broader framework of implicit learning theory and digital innovation in education.

3.2 Specific Pedagogical Implications

For Curriculum Design in Systems Engineering Programs the following pedagogical implications are summarized:

- **Early Implicit Learning Integration:** The rapid improvement from Video 1 to Video 2 suggests that implicit learning exercises should be introduced in the first semester. Programming fundamentals courses should include pattern recognition drills that leverage the natural procedural learning capacity of students, moving beyond purely explicit instruction methods.
- **Temporal Perception Training:** The reported «perception of time» difficulty in Video 1 correlates with challenges in real-time systems and concurrent programming. The curriculum should incorporate timing exercises, deadline management tasks, and synchronous event coordination drills from the first semester to develop this core engineering competency.
- **Development of Cognitive Flexibility:** The significant performance drop in Video 3 indicates a pedagogical gap. Courses must explicitly train pattern switching, paradigm adaptation, and mental model restructuring—skills essential for modern software development, where technology stacks change rapidly. This could involve alternating between programming paradigms (procedural → object-oriented → functional) within a single set of problems.
- **Error Pattern Analysis:** The «lack of stimulus clarity» issue suggests that students need training in signal/noise discrimination relevant to debugging and system analysis. Pedagogical approaches should emphasize distinguishing essential patterns from incidental details in both code and system behaviors.
- **Scaffolded Repetition Strategy:** The 2-4 repetition range for effective learning indicates that engineering exercises should be designed with optimal repetition cycles—sufficient for pattern internalization but avoiding automation that inhibits adaptability to new contexts.
- **Metacognitive Awareness Development:** Since students showed improved «time management» in Video 3 despite lower accuracy, instruction should explicitly address the speed-accuracy tradeoff, teaching when to prioritize precision (e.g., Algorithm design) versus speed (e.g., prototyping).

3.3 Implementation Recommendations

- Introducing implicit learning modules in «Introduction to Programming» courses
- Create pattern-switching exercises in data structure and algorithm courses
- Incorporating temporal processing tasks and real-time system prerequisites in operating systems
- Development of assessment methods that measure pattern acquisition and transfer capacities

This evidence-based approach recognizes that engineering education must not only develop explicit technical knowledge but also the implicit cognitive architectures that support problem-solving and adaptation to evolving technological landscapes at the expert level.

3.4 Methodological projection: The VSRT can be extrapolated to other academic and professional domains.

The findings obtained through the application of the VSRT task to validate the learning of binary tree structures suggest a potential that transcends the specific domain of data structures. Given that implicit learning is characterized as an automatic, associative, non-conscious, and unintentional process [1], in which the cognitive system incidentally extracts the structural regularities of the environment, the methodology employed here may be extrapolated as an assessment and pedagogical intervention tool for other academic programs and professional contexts. The theoretical foundation supporting this extrapolation is grounded in Reber's central thesis, which demonstrates that implicit learning produces a tacit knowledge base that is abstract and representative of the environment's underlying structure and that such knowledge can be transferable applied to novel circumstances. This structural abstraction—enables the transfer of the VSRT paradigm to any domain whose subject matter is organized through sequential patterns, hierarchical relationships, or associative regularities. Under this premise, fields as diverse as the syntax of programming languages, electrocardiogram interpretation in medicine, recognition of jurisprudential patterns in law, music score reading, analysis of game states in chess, and identification of radiological patterns and diagnostic imaging all share an essential property with binary trees: the existence of structural regularities that the learner can implicitly internalize before being able to verbalize them.

Additional empirical evidence supports this hypothesis. [25] documented that implicit learning, measured through probabilistic SRT-type tasks, is independently related to academic performance in domains as far removed from the laboratory as foreign language acquisition and operates with relative independence from psychometric intelligence and working memory. This result suggests that the VSRT does not merely measure an isolated skill but rather captures a general-purpose cognitive mechanism with ecological validity in real educational scenarios. From an applied perspective, it is anticipated that the extrapolation of the VSRT could prove useful on at least three fronts: (i) as a diagnostic tool for estimating the degree of structural internalization that a student has achieved regarding a content area before being able to articulate it explicitly, thereby allowing the early identification of comprehension gaps undetectable through traditional assessments; (ii) as a curricular validation instrument, verifying whether the exposure sequences designed by the instructor effectively produce the expected implicit associations; and (iii) as a perceptual training mechanism in professions with high diagnostic demands (medicine, systems engineering, quality control, and aeronautical safety) where expert performance critically depends on the rapid and associative recognition of patterns, an ability that the literature closely

links to implicit processes rather than to deliberate reasoning. Consequently, although the validation presented in this work is circumscribed to the learning of binary trees, the domain-general nature of implicit learning and the accumulated evidence on structural transfer support the claim that the VSRT constitutes a methodologically replicable paradigm, one that can be adapted to other areas of knowledge through the prior identification of the sequences or structural regularities specific to each discipline. Future research could be oriented toward de-signing domain-specific variants of the VSRT, contributing to a line of educational research grounded in actual cognitive mechanisms.

As a final analysis, in methodological and operational terms, the scope of this work encompasses exploration activities such as gathering contextual and perceptual data; designing and producing audio micro-content; and deploying the intervention in real-world scenarios under a qualitative research design. Operational simplicity, technological inclusion, and adaptability to limited-connectivity environments are prioritized to ensure that procedures can be replicated in similar contexts and adopted by learners through tailored proposals.

4. Conclusions

Repeated exposure to visual stimuli and progressive familiarization with the question format enhances implicit learning task performance. As participants advanced through the videos, an improvement in response accuracy was observed, suggesting that repetition and practice are decisive factors in strengthening visual perception and pattern recognition, even in the absence of explicit instruction. Skills, such as time perception and the ability to recognize visual sequences, have significant impact on student performance. While the first video showed a predominance of errors due to unfamiliarity with the stimulus and time constraints, the subsequent videos evidenced a gradual adaptation to the task, which allowed faster and more accurate responses. This indicates that implicit learning can be optimized through repeated experiences that enable participants to adjust their attention and visual processing. In the case of the calculator, a qualitative analysis suggests that the use of this tool improves logical reasoning by enabling students to visualize the hierarchical structure of operations. Finally, the application of decision trees as an analysis technique proved effective for classifying participant performance, facilitating the identification of response patterns, and providing a solid basis for predicting implicit learning. This approach not only benefits education but also suggests potential applications in cognitive psychology, neuroscience, and artificial intelligence, where unconscious pattern recognition influences decision-making and behavior.

5. Future Work

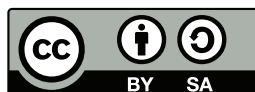
Future work will focus on expanding the study population to administer validated pre- and post-intervention assessments. This will enable a more rigorous empirical validation of the proposed

methodology, which is designed to harness implicit visual learning. Furthermore, continued experimentation is proposed to extend the implementation framework. This includes investigating the correlation between VSRT performance and individual learning styles and broadening the scope of application by integrating the VSRT paradigm into other STEM education domains that involve complex procedural and structural knowledge acquisition.

References

- [1] A. S. Reber, *Implicit Learning and Tacit Knowledge: An Essay on the Cognitive Unconscious*. Oxford, U.K.: Oxford University Press, 1993.
- [2] M. Barth, C. Stahl, and H. Haider, “How implicit sequence learning and explicit sequence knowledge are expressed in a serial reaction time task,” *Journal of Cognition*, vol. 8, no. 1, p. 30, 2025, <https://doi.org/10.5334/joc.439>
- [3] Y. Song, B. Millidge, T. Salvatori *et al.*, “Inferring neural activity before plasticity as a foundation for learning beyond backpropagation,” *Nature Neuroscience*, vol. 27, pp. 348–358, 2024, <https://doi.org/10.1038/s41593-023-01514-1>
- [4] F. Mora Teruel, *El cerebro del niño explicado a los padres*. Madrid, Spain: Alianza Editorial, 2021.
- [5] M. J. Nissen and P. Bullemer, “Attentional requirements of learning: Evidence from performance measures,” *Cognitive Psychology*, vol. 19, no. 1, pp. 1–32, 1987, [https://doi.org/10.1016/0010-0285\(87\)90002-8](https://doi.org/10.1016/0010-0285(87)90002-8)
- [6] M. T. Goodrich, “Teaching the analysis of algorithms with visual proofs,” *Computer Science Education*, vol. 20, no. 1, pp. 31–41, Mar. 2010.
- [7] A. Destrebecqz and A. Cleeremans, “Learning serial visual sequences: Evidence for an implicit learning process,” *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, vol. 31, no. 1, pp. 83–94, 2005.
- [8] K. M. H. Kim and A. Godfroid, “Learning without awareness: Variables that facilitate adult implicit learning,” *Language Learning*, vol. 73, suppl. 2, pp. 1–27, 2023, <https://doi.org/10.1111/lang.12616>
- [9] K. Janacek and D. Nemeth, “Implicit sequence learning and its development across the lifespan: A review,” *Cortex*, vol. 150, pp. 72–89, 2022, <https://doi.org/10.1016/j.cortex.2022.01.004>
- [10] A. S. Reber, “Implicit learning: Background, history, theory,” in *The Cognitive Unconscious: The First Half Century*, A. S. Reber and R. Allen, Eds. Oxford, U.K.: Oxford University Press, 2022, pp. 19–23, <https://doi.org/10.1093/oso/9780197501573.003.0001>
- [11] L. Chen, Y. Zhang, and J. Sweller, “Visual cognitive load in instructional design: The role of visual-spatial reasoning in learning complex content,” *Journal of Educational Psychology*, vol. 115, no. 1, pp. 68–84, 2023
- [12] T. H. Cormen, C. E. Leiserson, R. L. Rivest, and C. Stein, *Introduction to Algorithms*, 4th ed. Cambridge, MA, USA: MIT Press, 2022.
- [13] A. P. Boone and W. A. Cunningham, “Spatial cognition and unconscious learning: Integrating visuo-spatial reasoning training into cognitive development,” *Trends in Cognitive Sciences*, vol. 25, no. 3, pp. 215–228, 2021,
- [14] S. A. Park, D. S. Miller, H. Nili, C. Ranganath, and E. D. Boorman, “Map making: Constructing, combining, and inferring on abstract cognitive maps,” *Neuron*, vol. 107, no. 6, pp. 1226–1238.e8, 2020, <https://doi.org/10.1016/j.neuron.2020.06.030>

- [15] A. B. Levina, P. G. Chernenko, and S. V. Boyko, "Binary code compression based on decision trees," in *Communications in Computer and Information Science*, vol. 2603. Cham, Switzerland: Springer, 2026, pp. 155-167, https://doi.org/10.1007/978-3-032-04758-8_12
- [16] L. Sun, M. A. Rodriguez, and P. Kumar, "Teaching Huffman coding through interactive binary tree visualizations: An educational framework," *Computer Science Education*, vol. 35, no. 1, pp. 45-67, 2025
- [17] R. E. Mayer and L. Fiorella, Eds., *The Cambridge Handbook of Multimedia Learning*, 2nd ed. Cambridge, U.K.: Cambridge University Press, 2022 <https://doi.org/10.1017/9781108894333>
- [18] G. Yildiz, C. O. Güzeller, and Z. Özmen, "The effect of multisensory instructional approach on the academic achievement and retention of students," *Journal of Education and Practice*, vol. 11, no. 9, pp. 148-159, 2020
- [19] E. Doğan, B. Yıldız, and Ö. Kızılkaya, "Visualizing algorithms to enhance understanding in data structures," *International Journal of Computer Science Education*, vol. 11, no. 2, pp. 45-56, 2022.
- [20] H. Lee, S. Kim, and J. Park, "Graphical programming for algorithm education," *Computers & Education*, vol. 165, p. 104151, 2021 <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2021.104151>
- [21] R. Gómez-Pablos, M. del Pozo, and A. Muñoz-Repiso, "Using digital resources for active learning in computer science," *Education and Information Technologies*, vol. 25, no. 3, pp. 2113-2133, 2020
- [22] M. T. Goodrich, R. Tamassia, and M. H. Goldwasser, *Data Structures and Algorithms in Python*, 2nd ed. Hoboken, NJ, USA: Wiley, 2022.
- [23] A. Goujon, J.-F. Héroul, and N. Grimault, "Complex procedural knowledge in computing: An analytical framework for studying learning in programming," *Revue Française de Pédagogie*, no. 212, pp. 53-72, 2021
- [24] E. R. Hilgard, *Personality and Hypnosis: A Study of Imaginative Involvement*. Chicago, IL, USA: University of Chicago Press, 1979
- [25] B. Kaufman, C. G. DeYoung, J. R. Gray, L. Jiménez, J. Brown, and N. Mackintosh, "Implicit learning as an ability," *Cognition*, vol. 116, no. 3, pp. 321-340, 2010 <https://doi.org/10.1016/j.cognition.2010.05.011>





Evaluación de la pérdida de sedimento del río Pamplonita en el sector “La Gazapa”, mediante datos satelitales y fotogrametría aérea

Assessment of sediment loss from the Pamplonita River in the “La Gazapa” sector, using satellite data and aerial photogrammetry

Carlos Alexis Bonilla Granados ¹, Jarol Derley Ramón Valencia ², Diego Iván Sánchez Tapiero ³

Fecha de Recepción: 12 de abril de 2026

Fecha de Aceptación: 31 de julio de 2026

Cómo citar: C. A. Bonilla-Granados, J. D. Ramón-Valencia y D. I. Sánchez-Tapiero, «Evaluación de la pérdida de sedimento del río Pamplonita en el sector “La Gazapa”, mediante datos satelitales y fotogrametría aérea», *Tecnura*, vol. 30, n.º 89, jul. 2026. 107–120. <https://doi.org/10.14483/22487638.25000>

Resumen

Contexto: Los cursos fluviales presentan una dinámica morfológica continua que puede comprometer la estabilidad de obras de infraestructura hidráulica e hipogeas, como los puentes. Fenómenos como la erosión, la sedimentación, la migración lateral del cauce y las actividades antrópicas de extracción de material de arrastre incrementan la vulnerabilidad de las estructuras aledañas.

Objetivo: Evaluar las modificaciones en la morfología del lecho de un tramo del río Pamplonita, en el sector del puente La Gazapa (Cúcuta, Colombia), producidas por los procesos de pérdida de sedimento.

Metodología: Se analizaron las variaciones topográficas del lecho en el periodo 2011-2024 mediante la integración de datos de topografía convencional, sensores remotos satelitales y fotogrametría aérea con vehículos aéreos no tripulados (UAV). Para el estado inicial (2011), los datos satelitales obtenidos de la *Alaska Satellite Facility* se procesaron y calibraron junto con levantamientos topográficos de campo para generar un Modelo Digital de Elevación (MDE) en un Sistema de Información Geográfica (SIG). Para el estado final (2024), se construyó un MDE multitemporal derivado de imágenes capturadas con UAV, procesadas en Agisoft Metashape e integradas en el SIG.

Resultados: Se determinó que el tramo analizado presenta un perfil longitudinal con pendientes comprendidas entre el $\pm 3\%$ y secciones transversales de tipo encajonado. El análisis diferencial de las superficies topográficas estimó una pérdida acumulada de material en el lecho de aproximadamente 547.000 m³, lo que representa un socavamiento o descenso medio de 5 metros de profundidad en la zona de estudio.

1 PhD Ingeniería del Agua y Medio Ambiente, MSc. en Tecnologías para el Manejo de Aguas y Residuos, Ingeniero Civil, Docente e Investigador de la Facultad de Ingenierías y Arquitectura, Grupo de Investigación Etenoha, Universidad de Pamplona. Pamplona, Colombia. Email: carlos.bonilla@unipamplona.edu.co

2 PhD Ingeniería Ambiental, MSc. en Ingeniería Ambiental, Ingeniero de Ambiental, Docente e Investigador de la Facultad de Ingenierías y Arquitectura, Grupo de Investigaciones Ambientales Agua, Aire y Suelo (GIAAS), Universidad de Pamplona. Pamplona, Colombia. Email: jarol.ramon@unipamplona.edu.co

3 MSc. en Ingeniería Ambiental, Ingeniero Civil, Docente e Investigador de la Facultad de Ingenierías y Arquitectura, Grupo de Investigación Etenoha, Universidad de Pamplona. Pamplona, Colombia. Email: diego.sanchez@unipamplona.edu.co

Conclusiones: La metodología integrada (UAV-SIG-Satélite) demostró ser una herramienta eficaz para el monitoreo morfológico multitemporal de cauces urbanos, permitiendo identificar zonas críticas de socavación que amenazan la estabilidad estructural del puente La Gazapa y aportando insumos técnicos para la gestión de riesgos y el diseño de obras de mitigación.

Palabras clave: Datos satelitales, fotogrametría con UAV, lecho de río, Modelo Digital de Elevación (MDE), morfología fluvial.

Abstract

Context: Rivers undergo constant morphological changes that can compromise the stability of hydraulic infrastructure such as bridges. Erosion, sedimentation, lateral channel migration, and riverbed material extraction activities can increase the vulnerability of nearby structures.

Objective: To assess the impact on the morphology of a section of the Pamplonita riverbed in the area of the “La Gazapa” bridge in Cúcuta, Colombia.

Methodology: Topographic changes in the riverbed between 2011 and 2024 were assessed through the integration of conventional topographic surveys, satellite data, and drone-based photogrammetry. For 2011, satellite data obtained from the Alaska Satellite Facility were processed together with topographic surveys to generate a Digital Elevation Model (DEM) integrated into a Geographic Information System (GIS). For 2024, a DEM was generated from drone imagery processed in Agisoft Metashape and incorporated into the GIS.

Results: The studied river section was found to have a longitudinal profile with slopes between $\pm 3\%$, as well as box-type cross sections. The topography analysis estimated an approximate cumulative loss of 547,000 m³ of bed material, equivalent to an average depth of 5 meters per square meter.

Conclusions: The topography was consistent despite differences in data sources, reflecting the influence of river dynamics and the bridge on the stability of the section, highlighting the need to implement mitigation and monitoring measures.

Keywords: Satellite data, drone photogrammetry, riverbed, Digital Elevation Model (DEM), fluvial morphology.

1. Introducción

Los ríos son sistemas dinámicos cuya morfología responde a la interacción continua entre procesos naturales y actividades antrópicas, los cuales inducen modificaciones progresivas en la configuración de sus cauces y llanuras de inundación [1], [2]. Estos cambios morfológicos alteran el régimen hidrodinámico y la capacidad de transporte de sedimentos, al tiempo que incrementan el nivel de riesgo para las obras de infraestructura crítica aledañas [1]– [3]. Los puentes, en particular, constituyen estructuras hidráulicas y viales fundamentales para la conectividad y el desarrollo socioeconómico de los entornos urbanos [4]; no obstante, su estabilidad estructural depende directamente de la evolución geomorfológica del lecho fluvial. Fenómenos como la erosión lateral y la socavación del lecho pueden degradar la capacidad de soporte de sus cimentaciones y estribos, generando vulnerabilidades que comprometen la seguridad funcional con severas repercusiones sociales y económicas en caso de colapso [5].

La socavación, entendida como el proceso erosivo originado por la interacción entre la dinámica del flujo y la presencia de estructuras sumergidas o encauzamientos [6], representa una de las principales

causas de fallo estructural en puentes. A este fenómeno natural se suman factores antrópicos no regulados, tales como la extracción desmedida de material de arrastre (gravas y arenas) del lecho, lo cual acelera la degradación del cauce, altera la pendiente longitudinal del río y desencadena impactos ecológicos negativos [1]. En este contexto, la evaluación del riesgo cimentada en la caracterización topográfica y morfológica de la dinámica fluvial resulta indispensable para anticipar procesos de inestabilidad y orientar la toma de decisiones e intervenciones oportunas [7], [8].

El avance de las tecnologías de teledetección y sensores remotos ha transformado substancialmente la caracterización y el monitoreo de los sistemas fluviales. Tanto las imágenes satelitales como los datos obtenidos mediante fotogrametría aérea se han consolidado como herramientas de alta precisión para el análisis geomorfológico. Estas técnicas permiten detectar con elevada resolución espacial y temporal las variaciones en el relieve, cuantificar pérdidas o ganancias volumétricas de sedimento y mapear patrones de migración lateral del cauce [9].

En particular, el empleo de vehículos aéreos no tripulados (UAV, por sus siglas en inglés) ha optimizado los levantamientos de campo al ofrecer una alternativa eficiente, de alta densidad de datos y con costos operativos reducidos frente a los métodos topográficos convencionales [10]–[12]. La fotogrametría aérea basada en UAV aprovecha el procesamiento de fotogramas de alta resolución para generar Modelos Digitales de Elevación (MDE) e insumos tridimensionales, los cuales constituyen la base para evaluar cuantitativamente la evolución del relieve en cauces urbanos [13], [14].

En este trabajo se analizó la evolución morfológica del lecho del río Pamplonita, en el tramo correspondiente al puente La Gazapa (Cúcuta, Colombia), durante el periodo 2011-2024. El estudio se fundamentó en la generación y procesamiento multitemporal de MDE derivados de datos satelitales, levantamientos topográficos y fotogrametría con UAV, integrados en un entorno de Sistemas de Información Geográfica (SIG). Esta investigación aporta insumos técnicos sobre la dinámica fluvial del tramo estudiado y evalúa el impacto de la pérdida de material de lecho en la estabilidad del lecho y de la infraestructura hidráulica asociada.

2. Localización

El área de estudio comprende el tramo del río Pamplonita contiguo al puente La Gazapa —denominado oficialmente puente Enrique Cuadros Corredor— (ver Figura 1), ubicado en el sector de Prados del Este (Comuna 4) de la ciudad de Cúcuta, departamento de Norte de Santander, Colombia. Esta estructura vial constituye un eje estratégico de conectividad entre el casco urbano de Cúcuta y el Anillo Vial Oriental, facilitando el tránsito de carga y pasajeros hacia los municipios del área metropolitana y la frontera colombo-venezolana. La construcción de la infraestructura concluyó en 2008 y su puesta en funcionamiento oficial tuvo lugar en julio de 2012. Por su parte, el río Pamplonita representa uno de los

afluentes principales de la cuenca del río Catatumbo, jugando un papel determinante en la dinámica ambiental regional, el abastecimiento hídrico municipal y el desarrollo de actividades productivas, entre las que destaca la extracción de material de arrastre [15].

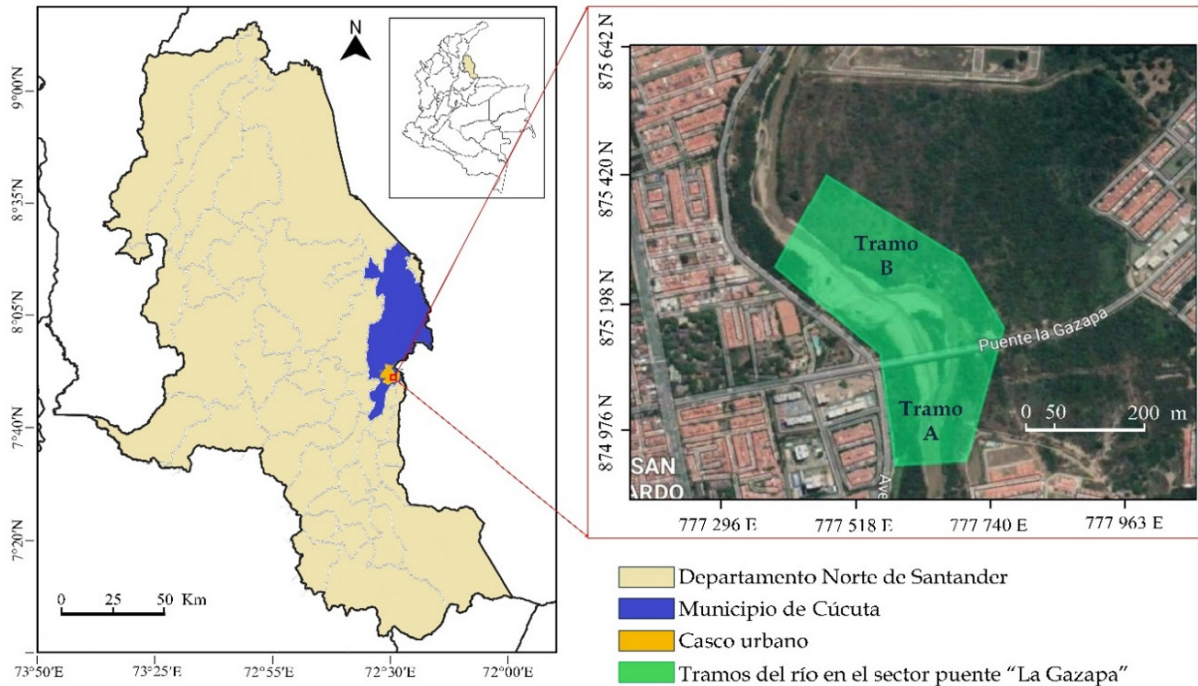


Figura 1. Ubicación de área de estudio.

Fuente: Autores.

3. Metodología

La presente investigación se enmarca en un diseño de tipo aplicado, de alcance explicativo y enfoque cuantitativo. Se estructuró como un estudio de caso sobre un tramo del río Pamplonita, en el sector del puente La Gazapa, orientado a analizar la evolución morfológica del lecho y evaluar las posibles causas asociadas a la pérdida de material de arrastre en el periodo 2011-2024. Para ello, se integraron datos satelitales y fotogrametría aérea basada en vehículos aéreos no tripulados (UAV).

El área de estudio se delimitó en dos subtramos de análisis: i) el tramo aguas arriba de la infraestructura (Tramo A) y ii) el tramo aguas abajo (Tramo B) (ver Figura 1). Esta zonificación se realizó con el propósito de aislar la superestructura del puente en el procesamiento de datos satelitales y fotogramétricos, evitando que la elevación de la obra civil interfiera en la reconstrucción continua de la superficie topográfica del terreno (*ground points*).

Para la caracterización topográfica correspondiente al año 2011, se emplearon datos satelitales procedentes del centro de datos de la *Alaska Satellite Facility* (ASF) de la Universidad de Alaska Fairbanks, comercializados a través del marco *Distributed Active Archive Center* (DAAC) de la NASA, especializado en sensores de Radar de Apertura Sintética (SAR) [16]. Se utilizaron productos RTC (*Radiometrically Terrain Corrected*) derivados del sensor ALOS PALSAR (*Advanced Land Observing Satellite – Phased Array L-band Synthetic Aperture Radar*), los cuales poseen una resolución espacial de 12,5 m. A partir de estas fuentes, se estructuró un Modelo Digital de Elevación (MDE) en el software QGIS (versión 3.8 Zanzíbar), el cual fue calibrado e integrado con levantamientos de topografía convencional *in situ*. Esta superficie combinada constituyó la línea base geométrica de comparación para el análisis multitemporal.

La caracterización del terreno para el año 2024 se fundamentó en un levantamiento fotogramétrico aéreo mediante un UAV DJI Phantom 4. El plan de vuelo se programó de manera autónoma, estableciendo un solape longitudinal y traslape transversal superiores al 70 %, garantizando los requerimientos de reconstrucción geométrica tridimensional [17]. La misión aérea tuvo una duración total de 47 minutos de vuelo, cubriendo la totalidad del dominio de estudio delimitado.

Las imágenes capturadas durante la misión fotogramétrica se procesaron mediante el software especializado *Agisoft Metashape* [18]. A partir de un conjunto de 394 fotogramas aéreos de alta resolución, se ejecutó la alineación, la densidad de nube de puntos y la posterior generación de la malla poligonal tridimensional. La validación posicional y el ajuste de reproyección espacial se sustentaron en Puntos de Control en Terreno (GCP, por sus siglas en inglés) levantados con topografía de alta precisión y georreferenciados en la zona de estudio. El Modelo Digital de Elevación (MDE) resultante se exportó en formato ráster (.tif) e importó en el software de código abierto QGIS (versión 3.8.0 Zanzíbar), bajo el sistema de referencia de coordenadas *World Geodetic System 1984* proyectado en la métrica *Pseudo-Mercator* (WGS 84 / EPSG:3857). Para la contextualización cartográfica del modelo y la comprobación de bordes del cauce, se emplearon capas base georreferenciadas de *Google Earth* y *Google Maps*.

El análisis geomorfológico multitemporal de los Tramos A y B se basó en el procesamiento diferencial de las superficies topográficas (MDE) correspondientes a los años 2011 y 2024. Para caracterizar la geometría del cauce, se trazó el eje del perfil longitudinal del río y se extrajeron secciones transversales a intervalos regulares de 10 m. Las pendientes y variaciones altimétricas de la línea de talweg se graficaron mediante la herramienta *Terrain Profile* de QGIS.

Finalmente, la estimación del balance volumétrico de sedimento se cuantificó en QGIS a través del algoritmo *Raster Surface Volume*, el cual calcula el volumen acumulado de una capa ráster con respecto a un plano datum de referencia. La herramienta se ejecutó para ambos periodos ajustando la cota umbral a las características locales de cada sector: para el Tramo A (aguas arriba) se fijó un plano base a 274,5 m s. n. m., mientras que para el Tramo B (aguas abajo) la cota de corte se estableció en 272,5 m s. n. m. Estos

niveles de referencia correspondieron a las curvas de nivel mínimas absolutas registradas en la batimetría/topografía fotogramétrica del lecho, garantizando una línea base homogénea para la comparación temporal.

4. Resultados

El perfil longitudinal y las secciones transversales del cauce en el sector de La Gazapa se ilustran en la Figura 2. En total se trazaron 53 secciones transversales: 13 ubicadas aguas arriba del puente (Tramo A) y 40 aguas abajo (Tramo B). En el Tramo A, los perfiles transversales abarcaron una extensión de 50 m a cada lado del eje longitudinal; por su parte, en el Tramo B, debido a la mayor anchura del cauce, la extensión de las secciones se amplió a 80 m hacia la margen izquierda y 100 m hacia la margen derecha, garantizando la cobertura geométrica de la llanura activa.

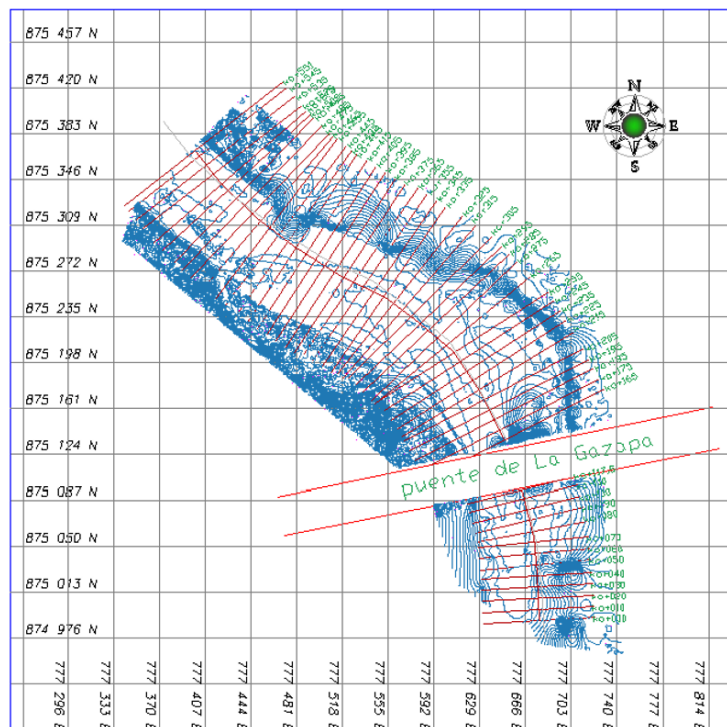


Figura 2. Vista en planta de la topografía del sector puente “La Gazapa”.

Fuente: Autores.

Los MDE procesados evidenciaron, en una primera aproximación visual, modificaciones morfológicas substanciales en el tramo de estudio durante el periodo evaluado, independientemente de las diferencias en la resolución de las técnicas de adquisición. En el MDE de 2011 prevalecieron tonalidades claras, asociadas a menores profundidades y cotas de lecho más elevadas. En contraste, en el MDE de 2024 se observó un predominio de tonalidades oscuras, lo que confirma un ahondamiento generalizado del cauce. Asimismo, se evidenció la diferencia en el nivel de detalle espacial según la fuente de datos: el

sensor satelital ofreció una caracterización del relieve regional a escala macro, mientras que la fotogrametría aérea con UAV aportó una alta resolución espacial centimétrica para el análisis local. En la Figura 3 se presenta la comparación entre el modelo ráster satelital (a) y el modelo fotogramétrico (b), ambos estructurados bajo un marco de normalización cartográfica homogéneo (sistema de referencia proyectado, escala gráfica, grilla de coordenadas, orientación al Norte y simbología altimétrica unificada), lo que asegura la comparabilidad espacial.

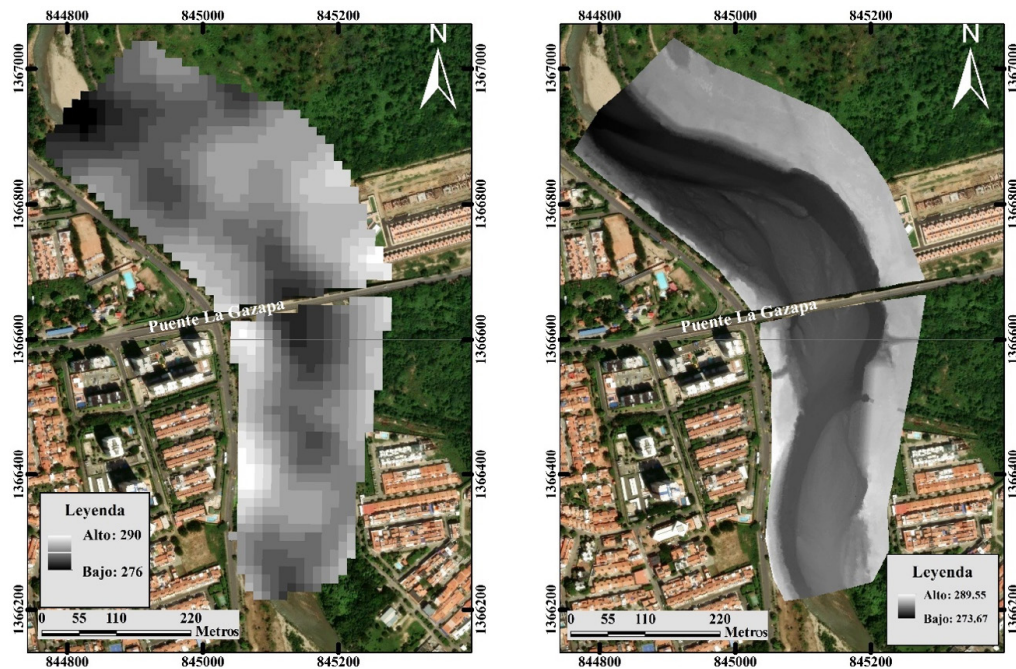


Figura 3. Ráster del modelo de elevación digital: a) datos satelitales y b) fotogrametría con dron.

Fuente: Autores.

El análisis diferencial de los MDE en el entorno SIG permitió evaluar las variaciones de la pendiente en el perfil longitudinal del cauce. En el Tramo A (aguas arriba), el perfil presentó oscilaciones acentuadas (entre el -20% y el +10%), lo que refleja un lecho con alta irregularidad topográfica caracterizado por alternancia de zonas de socavación profunda y barras de deposición. En contraste, el Tramo B (aguas abajo) exhibió fluctuaciones de pendiente más moderadas (entre el -6% y el +8%), con oscilaciones continuas de menor amplitud. Este comportamiento indica que el Tramo A está sujeto a procesos locales intensos de erosión y acumulación, mientras que en el Tramo B predomina una redistribución longitudinal del material de arrastre. El comportamiento aguas arriba de la estructura coincide con lo reportado por estudios previos, donde se documenta el retroceso de orillas por descalce y la amplificación de procesos erosivos asociados a la contracción del flujo causada por los apoyos del puente [17].

La Figura 4 muestra la variación porcentual de las pendientes a lo largo del perfil longitudinal. El eje horizontal representa la distancia acumulada sobre el eje del cauce (120 m para el Tramo A y 400 m para el Tramo B), mientras que el eje vertical expresa el porcentaje de pendiente (%), donde las cifras positivas representan pendientes ascendentes y las negativas, pendientes descendentes. La línea roja describe la variación puntual de la pendiente paso a paso; la línea verde representa la tendencia lineal general del tramo; y la línea negra actúa como plano de referencia o *datum* (cota base de 274,5 m s. n. m. para el Tramo A y 272,5 m s. n. m. para el Tramo B). Los valores situados por encima de este umbral indican sobreelevaciones del lecho, mientras que los valores inferiores representan zonas de incisión o pérdidas relativas de relieve.

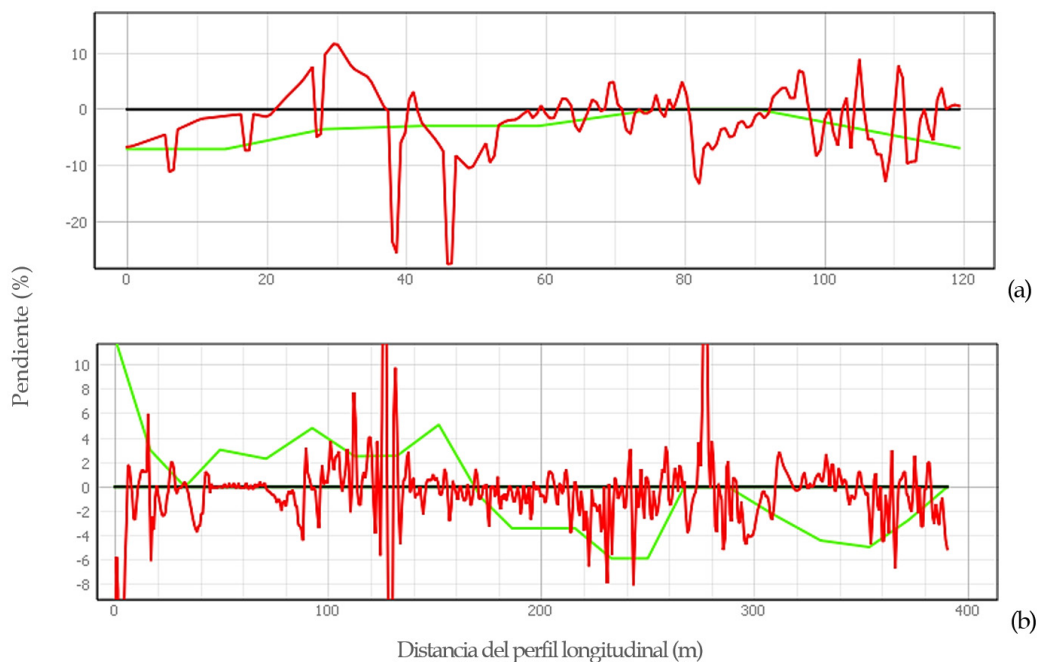


Figura 4. Variación del porcentaje de pendientes en el perfil longitudinal: a) tramo A y b) tramo B.

Fuente: Autores.

Para el análisis de las secciones transversales, se comparó la topografía del lecho del río obtenida mediante ambas técnicas para las 53 secciones trazadas. La Figura 5 ilustra las geometrías transversales representativas a lo largo del eje longitudinal. El eje horizontal representa la distancia sobre la transversal del cauce (ancho del río medido de margen a margen) y el eje vertical expresa la cota o elevación del terreno (m s. n. m.). Las líneas verde y roja corresponden a las superficies del terreno levantadas para los años 2011 y 2024, respectivamente.

La superposición de los perfiles en la Figura 5 muestra que, en la mayoría de las secciones, la superficie de 2024 (línea roja) se posiciona por debajo de la de 2011 (línea verde), lo que evidencia un proceso generalizado de incisión y profundización del lecho. En sectores puntuales se observa un comportamiento

inverso, correspondiente a la acumulación local de sedimentos. En conjunto, estos patrones sugieren una dinámica combinada de socavación y deposición, influenciada por la migración natural del cauce y por la alteración de las líneas de corriente generada por la infraestructura del puente [19]. Asimismo, los eventos climáticos extremos (particularmente los periodos de lluvias intensas asociados a la variabilidad hidrológica) han exacerbado la erosión en el sector, al punto de comprometer las obras de protección de la vía y provocar el colapso de muros de contención [20]-[22]. A estas presiones naturales se suman las intervenciones antrópicas asociadas a la extracción no regulada de materiales de arrastre para la construcción [23].

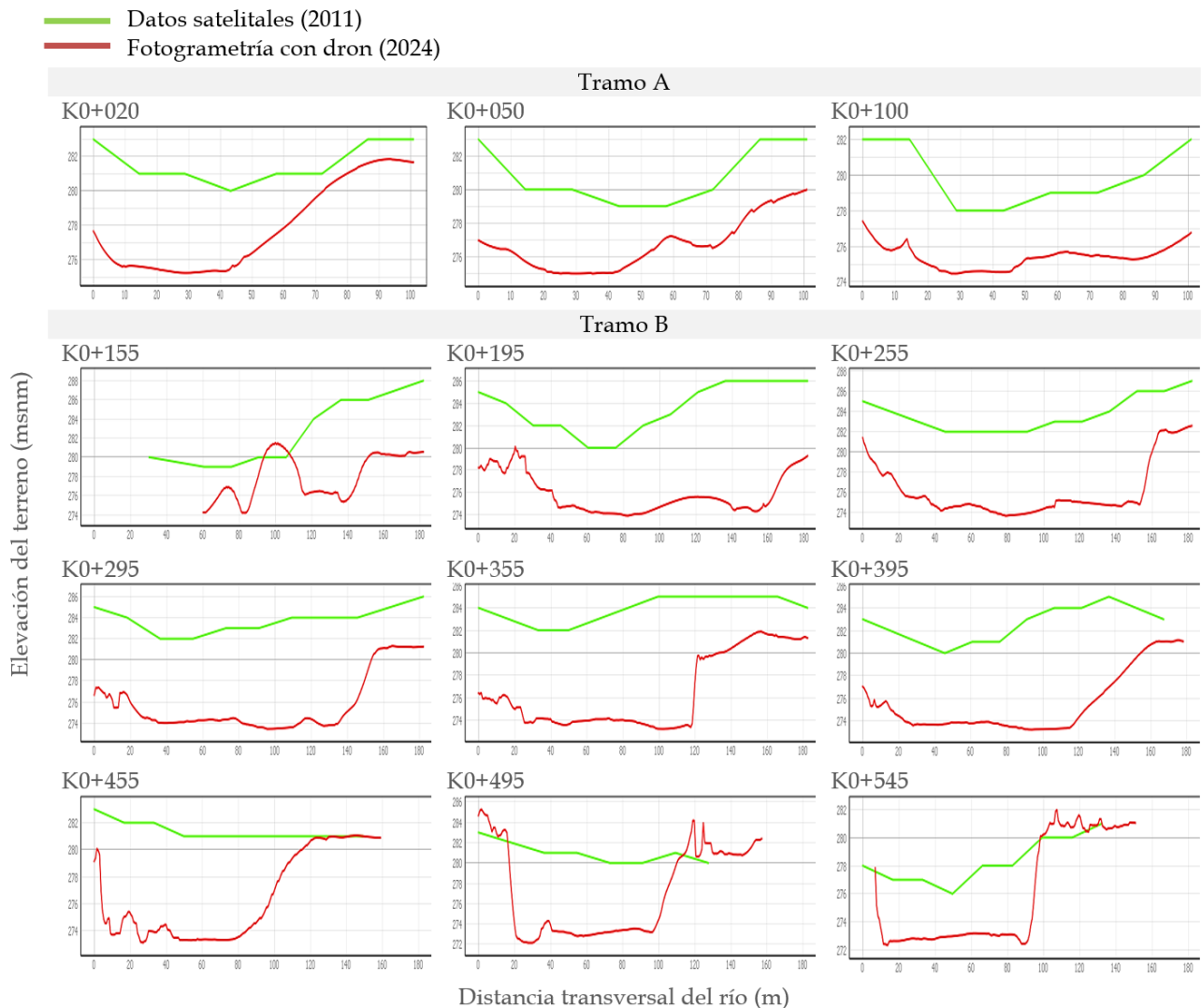


Figura 5. Comparación de las secciones transversales del cauce con base en datos satelitales (2011) y fotogrametría con dron (2024).

Fuente: Autores.

La pendiente longitudinal del tramo oscila predominantemente entre el -3% y el +3%, lo que refleja variaciones locales en la disipación de energía del flujo. Por su parte, la sección transversal exhibe una morfología predominantemente encajonada. De acuerdo con el sistema de clasificación de Rosgen [23], estas características permiten tipificar el tramo del río dentro de los patrones B, C y E, correspondientes a canales con pendientes moderadas a bajas, configuraciones de ancho-profundidad variables y dinámicas fluviales gobernadas por la sinuosidad y el transporte de sedimentos.

La cuantificación del balance de sedimento en el lecho para el periodo 2011-2024 se sintetiza en la Tabla 1. En el Tramo A (aguas arriba), el volumen disponible en el lecho se redujo de 137 350 m³ en 2011 a 66 959 m³ en 2024, lo que representa una pérdida neta de 70 391 m³ en un área inundable de 18 425 m². Por su parte, el Tramo B (aguas abajo) registró una contracción volumétrica de 857 217 m³ en 2011 a 380 449 m³ en 2024, equivalente a un déficit de 476 768 m³ en una extensión de 81 373 m². Si bien ambos sectores experimentaron una degradación severa, la magnitud de la erosión fue notablemente superior en el Tramo B, en concordancia con la mayor amplitud de su llanura de inundación y la concentración de líneas de flujo aguas abajo de la obra de arte.

Tabla 1. Estimación del volumen de lecho del río desplazado del 2011 y 2024 del sector puente “La Gazapa”.

Tramo	Área (m ²)	Volumen desplazado (m ³)	Área total (m ²)	Volumen total (m ³)
A	18.425	70.391	99.798	547.159
B	81.373	476.768		

Fuente: Autores.

De manera complementaria, la Figura 6 ilustra la variabilidad multitemporal de la huella del cauce en el sector del puente La Gazapa para el periodo 2011-2024, digitalizada a partir de imágenes satelitales de *Google Earth*. Las poligonales destacadas en color naranja delimitan las zonas con mayor migración lateral de la banda de flujo, las cuales coinciden con los sectores que registraron las mayores tasas de pérdida volumétrica de sedimento. Las líneas de contorno anuales evidencian un desplazamiento progresivo del eje del río, lo que confirma que la redistribución del material de arrastre no solo se manifiesta en la incisión del lecho, sino también en una marcada inestabilidad planimétrica caracterizada por la erosión marginal y el socavamiento de orillas.

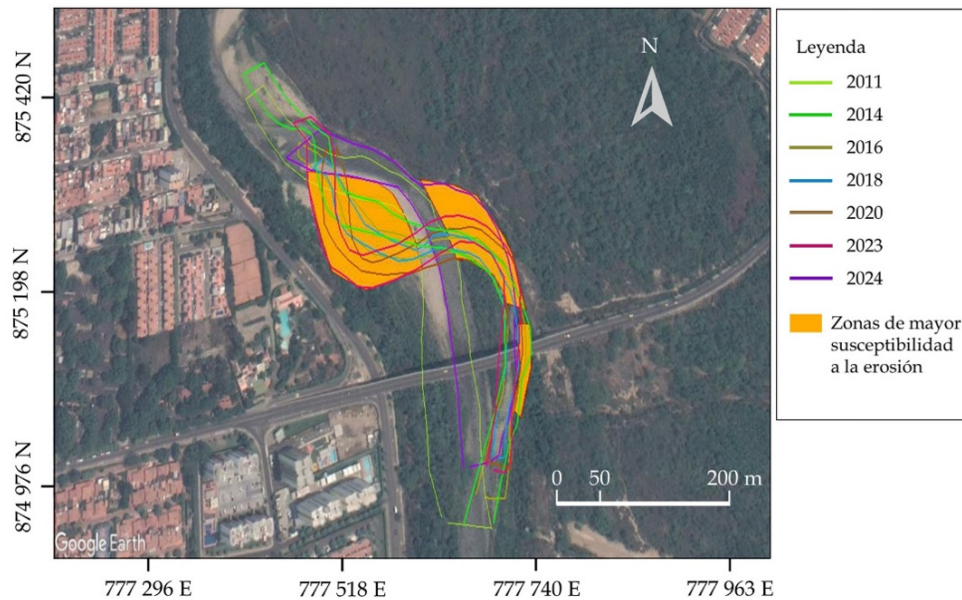


Figura 6. Variación del cauce del río en el sector “La Gazapa” (2011-2024) en Google Earth.

Fuente: Autores.

La pérdida significativa de material en el lecho y la persistencia de focos críticos de socavación acentúan la urgencia de evaluar el riesgo hidráulico e estructural del puente La Gazapa, así como de implementar medidas de mitigación que garanticen su estabilidad operativa. Como acciones prioritarias de intervención, se sugiere ejecutar labores de dragado selectivo, rectificación y encauzamiento del lecho [19]. Estas recomendaciones concuerdan con lo planteado en la literatura especializada, donde se subraya la necesidad de adoptar esquemas de mantenimiento preventivo y obras de protección en la cimentación de puentes para prevenir fallas estructurales o el colapso de apoyos [24], [25]. Finalmente, además de las variables hidrodinámicas e hidroclimáticas, las presiones antrópicas documentadas en el sector —como la extracción no controlada de agregados pétreos [26]— incrementan la vulnerabilidad del cauce y aceleran los procesos de erosión retrogresiva [6], [7]. En consecuencia, la gestión del riesgo en este tramo debe abordar de forma integral tanto la dinámica fluviomorfológica natural como los impactos derivados de la actividad humana.

5. Conclusiones

El análisis comparativo de los MDE correspondientes a los años 2011 y 2024 permitió cuantificar el impacto geomorfológico en el lecho del río Pamplonita, en el sector del puente La Gazapa. Los resultados confirman una alteración morfológica severa, caracterizada por una pérdida neta acumulada de aproximadamente 547 159 m³ de material de arrastre en el área de estudio. Este volumen equivale a un descenso medio del nivel del lecho cercano a 5,5 m, evidenciando la predominancia de procesos intensivos de incisión, erosión retrogresiva y socavación generalizada.

La evaluación espacial por subtramos reflejó respuestas hidrogeomorfológicas diferenciadas aguas arriba (Tramo A) y aguas abajo (Tramo B) de la infraestructura. La presencia de las cimentaciones del puente actúa como un elemento de severa perturbación del régimen hidráulico local, derivando en una magnificación de la erosión aguas abajo (Tramo B), donde se registró el 87,13 % del volumen total perdido. Estos hallazgos evidencian la urgencia de implementar obras de protección en los apoyos de la estructura y establecer un programa de monitoreo topo-batimétrico periódico para vigilar la evolución del cauce.

A pesar de la heterogeneidad en las fuentes de adquisición de datos —un MDE satelital para la línea base de 2011 y un levantamiento fotogramétrico por UAV para la superficie de 2024—, la integración multitemporal demostró una sólida coherencia espacial y geomorfológica. La metodología empleada permitió identificar con precisión patrones continuos de erosión, transporte y deposición de sedimentos a escala de detalle, validando el uso combinado de sensores remotos y fotogrametría aérea en estudios de dinámica fluvial.

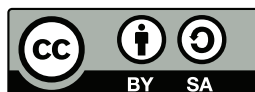
En síntesis, la interacción entre la restricción hidráulica impuesta por el puente, la variabilidad hidrocliclimática y las intervenciones antrópicas (como la extracción de áridos) constituye una amenaza crítica para la integridad estructural de la obra civil. Se concluye sobre la necesidad imperativa de incorporar herramientas geoespaciales de alta resolución en la evaluación continua del riesgo hidráulico, la ordenación de cuencas y la gestión preventiva de la infraestructura vial en la cuenca del río Pamplonita.

Referencias

- [1] M. K. Dhali, S. Ayaz, M. Sahana, and S. Guha, “Response of sediment flux, bridge scouring on river bed morphology and geomorphic resilience in middle-lower part of river Chel, Eastern Himalayan foothills zone, India,” *Ecol. Eng.*, vol. 142, p. 105632, Jan. 2020, <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2019.105632>
- [2] Y. Zhang, B. Chen, S. Wang, and X. Zhang, “Physical model research on the impact of bridge piers on river flow in parallel bridge construction projects,” *Appl. Sci. (Switzerland)*, vol. 15, no. 12, p. 6581, Jun. 2025, <https://doi.org/10.3390/app15126581>.
- [3] T. Lazzarin, G. Constantinescu, and D. P. Viero, “Advanced hydrodynamic modelling of flow at a river bridge: Insights from 3D computational fluid dynamics,” in *Procedia Structural Integrity*, Elsevier B.V., 2024, pp. 625–632, <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2024.09.087>
- [4] M. Pregnotato, A. O. Winter, D. Mascarenas, A. D. Sen, P. Bates, and M. R. Motley, “Assessing flooding impact to riverine bridges: An integrated analysis,” *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, vol. 22, no. 5, pp. 1559–1576, May 2022, <https://doi.org/10.5194/nhess-22-1559-2022>
- [5] V. Hrissanthou, “Research on hydraulics and river dynamics,” *Water (Switzerland)*, vol. 14, no. 19, p. 3018, Oct. 2022 <https://doi.org/10.3390/w14193018>

- [6] A. Pizarro, S. Manfreda, and E. Tubaldi, “The science behind scour at bridge foundations: A review,” *Water (Switzerland)*, vol. 12, no. 2, p. 374, Feb. 2020 <https://doi.org/10.3390/w12020374>
- [7] A. M. Bento, A. Gomes, T. Viseu, L. Couto, and J. P. Pêgo, “Risk-based methodology for scour analysis at bridge foundations,” *Eng. Struct.*, vol. 223, p. 111115, Nov. 2020, <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.111115>
- [8] L. Buonora, B. Moccia, E. Ridolfi, F. Russo, and F. Napolitano, “Safety assessment of bridges: Analysis and criticalities of the guidelines for hydraulic risk management,” in *Procedia Structural Integrity*, Elsevier B.V., 2024, pp. 647–652, <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2024.09.090>
- [9] D. Backes, M. Smigaj, M. Schimka, V. Zahs, A. Grznárová, and M. Scaioni, “River morphology monitoring of a small-scale alpine riverbed using drone photogrammetry,” in *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*, International Society for Photogrammetry and Remote Sensing, Aug. 2020, pp. 1017–1024 <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLIII-B2-2020-1017-2020>
- [10] A. K. H. Dewedar, D. Palumbo, and M. Pepe, “Hydraulic risk assessment on historic masonry bridges using hydraulic open-source software and geomatics techniques: A case study of the ‘Hannibal Bridge’, Italy,” *Remote Sens. (Basel)*, vol. 16, no. 16, p. 2994, Aug. 2024 <https://doi.org/10.3390/rs16162994>
- [11] P. Paron, M. Mazzoleni, A. Reali, L. Brandimarte, T. Hackl, and B. Adey, “To drone or not to drone? Impact of UAV photogrammetry on the flood simulation process of bridges in mountain regions,” Madrid, 2019. [Online]. Available: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/109439>
- [12] J. Vorobioff, N. Boggio, M. Gutierrez, F. Checozzi, and C. Rinaldi, “Design of drones for monitoring of volcanic areas,” *Tecnura*, vol. 24, no. 66, pp. 27–35, Oct. 2020, <https://doi.org/10.14483/22487638.16800>
- [13] B. Arévalo Vera, E. Bayona Ibáñez, and I. K. Rincón Parada, “Metodología para documentación 3D utilizando fotogrametría digital,” *Revista Tecnura*, vol. 19, pp. 113–120, 2015, <https://doi.org/10.14483/udistrital.jour.tecnura.2015.SE1.a09>
- [14] J. O. Escalante Torrado, J. J. Cáceres Jiménez, and H. Porras Díaz, “Ortomosaicos y modelos digitales de elevación generados a partir de imágenes tomadas con sistemas UAV,” *Revista Tecnura*, vol. 20, no. 50, pp. 119–140, 2016 <https://doi.org/10.14483/udistrital.jour.tecnura.2016.4.a09>
- [15] CORPONOR, “Plan de Ordenación y Manejo de la Cuenca Hidrográfica del Río Pamplonita,” 2010. [Online]. Available: <https://repositorio.gestiondelriesgo.gov.co:8443/handle/20.500.11762/22602>
- [16] University of Alaska Fairbanks, “Alaska Satellite Facility,” NASA Distributed Active Archive Center (DAAC) for Synthetic Aperture Radar (SAR). [Online]. Available: <https://asf.alaska.edu>
- [17] T. Gracchi, G. Rossi, C. T. Stefanelli, L. Tanteri, R. Pozzani, and S. Moretti, “Tracking the evolution of riverbed morphology on the basis of UAV photogrammetry,” *Remote Sens. (Basel)*, vol. 13, no. 4, pp. 1–16, Feb. 2021 <https://doi.org/10.3390/rs13040829>
- [18] Agisoft, “Agisoft Metashape User Manual Professional Edition, Version 1.8,” 2022. [Online]. Available: https://www.agisoft.com/pdf/metashape-pro_1_8_en.pdf
- [19] CORPONOR, Resolución 137 de 2018. Colombia, 2018, p. 14. [Online]. Available: https://www.corponor.gov.co/ACTOSJURIDICOS/RESOLUCIONES/2018/RESOLUCION_137_18.pdf
- [20] N. Mojica, “El puente La Gazapa en Cúcuta está a pocos metros de la tragedia,” *La Opinión*, Cúcuta, May 24, 2024. [Online]. Available: <https://www.laopinion.co/cucuta/el-puente-la-gazapa-en-cucuta-esta-pocos-metros-de-la-tragedia>

-
- [21] N. Mojica, “Una problemática silenciosa ronda en el puente La Gazapa de Cúcuta,” *La Opinión*, Cúcuta, Feb. 13, 2025. [Online]. Available: <https://www.laopinion.co/cucuta/una-problematica-silenciosa-ronda-en-el-puente-la-gazapa-de-cucutagbv>
- [22] M. J. Salcedo, “Por riesgo de colapso admiten acción popular sobre puente de La Gazapa,” *La Opinión*, Cúcuta, Apr. 24, 2025. [Online]. Available: <https://www.laopinion.co/cucuta/por-riesgo-de-colapso-admiten-accion-popular-sobre-puente-de-la-gazapa>
- [23] D. L. Rosgen, “Catena A classification of natural rivers,” *Catena (Amst)*, vol. 22, pp. 169–199, 1994 [https://doi.org/10.1016/0341-8162\(94\)90001-9](https://doi.org/10.1016/0341-8162(94)90001-9)
- [24] J. S. Tan, K. Elbaz, Z. F. Wang, J. S. Shen, and J. Chen, “Lessons learnt from bridge collapse: A view of sustainable management,” *Sustainability (Switzerland)*, vol. 12, no. 3, Feb. 2020, <https://doi.org/10.3390/su12031205>
- [25] S. A. Derseh and T. A. Mohammed, “Bridge structures under progressive collapse: A comprehensive state-of-the-art review,” Jun. 01, 2023, Elsevier B.V., doi: <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.101090>
- [26] areacucuta.com, “Capturadas siete personas por extracción ilegal de material aluvión del río Pamplonita,” *areacucuta.com El portal de Cúcuta*, Cúcuta, Oct. 2014. [Online]. Available: <https://www.areacucuta.com/capturadas-siete-personas-por-extraccion-ilegal-de-material-aluvion-del-rio-pamplonita/>





Hidroxiapatita: material alternativo en la inertización de polvo de carbón en minas subterráneas

Hydroxyapatite as an Alternative Inerting Material for Underground Coal-Dust Control

Juliana Andrea Chaparro Laguado¹, Adriana del Pilar Castañeda Rojas², Kevin Leandro Rosas Barrera³

Fecha de Recepción: 14 de abril de 2026

Fecha de Aceptación: 31 de julio de 2026

Cómo citar: Chaparro Laguado, J.A. Castañeda Rojas, A.P. y Rosas Barrera, K.L., «Hidroxiapatita: material alternativo en la inertización de polvo de carbón en minas subterráneas», *Tecnura*, vol. 30, n.º 89, jul. 2026. 121–132. <https://doi.org/10.14483/22487638.25006>

Resumen

Contexto: Las explosiones por polvo de carbón en suspensión constituyen uno de los riesgos más críticos en la minería subterránea. Para mitigar este fenómeno se aplica la inertización, medida preventiva basada en la dispersión de un material inerte que reduce la inflamabilidad y favorece la captura de partículas. Aunque la caliza ha sido el material de referencia tradicional, su alta sensibilidad a la humedad degrada su adherencia y dispersabilidad, lo que limita la homogeneidad de la mezcla y disminuye la eficacia del proceso.

Objetivo: Evaluar el desempeño de la hidroxiapatita (HAp) como material alternativo para la inertización en minas de carbón subterráneas, analizando su viabilidad térmica y eficacia en la reducción del riesgo de explosividad en comparación con el polvo de caliza comercial.

Metodología: Se sintetizó HAp mediante dos rutas químicas: precipitación en vía húmeda (HAp-VH) y reacción en estado sólido (HAp-VS). La confirmación estructural se realizó por espectroscopía de infrarrojo por transformada de Fourier (FTIR). Las propiedades térmicas (conductividad y capacidad calorífica) se determinaron mediante un analizador de propiedades térmicas TEMPOS, mientras que la eficacia de inertización y reflectancia se evaluaron con un medidor de explosividad CDEM-1000 sobre mezclas de polvo de carbón e inerte.

Resultados: El análisis por FTIR confirmó la formación de la fase cristalina de HAp mediante la presencia de las bandas de vibración características del ion fosfato (PO_4^{3-}) y del grupo hidroxilo (OH), sin evidenciar carbonatos residuales. En las pruebas térmicas, la HAp-VS registró una baja conductividad térmica ($0,111 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$), mientras que la HAp-VH exhibió una estabilidad térmica análoga a la caliza. Las pruebas de explosividad en el CDEM-1000 demostraron que la HAp alcanzó niveles de inertización equivalentes a la caliza, logrando una respuesta no explosiva con proporciones de inerte del 92,5 % para HAp-VS y del 93,0 % para HAp-VH.

- 1 Estudiante de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia (UPTC), sede Sogamoso, Boyacá. Miembro del grupo de investigación GEAM. Correo electrónico: juliana.chaparro03@uptc.edu.co
- 2 Químico con Especialización en Seguridad y Calidad Alimentaria. Docente de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia (UPTC), sede Sogamoso, Boyacá. Correo electrónico: adriana.castaneda03@uptc.edu.co
- 3 Ingeniero Químico PhD(c) en Ingeniería Química. Docente de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia (UPTC), sede Sogamoso, Boyacá. Correo electrónico: kevin.rosas@uptc.edu.co

Conclusiones: La hidroxiapatita sintetizada por ambas rutas químicas (estado sólido y vía húmeda) demostró una capacidad de inertización comparable a la del polvo de caliza convencional, requiriendo fracciones másicas de inerte superiores al 92,5 %. Estos hallazgos validan a la hidroxiapatita como un material alternativo técnicamente viable para la prevención de explosiones por polvo de carbón en minería subterránea.

Palabras clave: explosividad de polvo de carbón, hidroxiapatita, inertización de minas, precipitación vía húmeda, propiedades térmicas.

Abstract

Context: Dust explosions represent one of the most critical hazards in underground coal mining. To mitigate this risk, rock dusting (inertization) is applied as a preventive measure by dispersing an inert material to reduce dust flammability and promote particle agglomeration. Although limestone has been the standard reference material, its high moisture sensitivity impairs adherence and dispersibility, hindering uniform mixing and reducing overall process efficiency.

Objective: To evaluate hydroxyapatite (HAp) as an alternative material for coal mine inertization by analyzing its thermal viability and effectiveness in reducing explosion hazards compared to commercial limestone powder.

Methodology: HAp was successfully synthesized via two chemical routes: wet chemical precipitation (HAp-VH) and solid-state reaction (HAp-VS). Structural characterization was confirmed using Fourier-Transform Infrared Spectroscopy (FTIR). Thermal properties (thermal conductivity and heat capacity) were measured using a TEMPOS thermal properties analyzer, while inertization efficiency and reflectance were evaluated using a CDEM-1000 coal dust explosibility meter on coal-inert dust mixtures.

Results: FTIR spectra confirmed the synthesis of pure HAp by identifying characteristic vibration bands of phosphate (PO_4^{3-}) and hydroxyl (OH) groups, with no detectable residual carbonates. Thermal evaluations indicated that HAp-VS exhibited low thermal conductivity ($0,111 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$), whereas HAp-VH showed thermal stability comparable to limestone. Explosibility tests on the CDEM-1000 demonstrated that hydroxyapatite achieved inertization levels equivalent to limestone, reaching non-explosive thresholds at inert mass fractions of 92.5 % (HAp-VS) and 93.0 % (HAp-VH).

Conclusions: Hydroxyapatite synthesized through both chemical routes (solid-state and wet precipitation) demonstrated an inertization capacity comparable to conventional limestone powder, requiring inert fractions above 92.5 %. These results confirm that hydroxyapatite is a technically viable alternative for mitigating coal dust explosion risks in underground mining operations.

Keywords: coal dust explosibility, hydroxyapatite, mine inertization, thermal properties, wet precipitation.

Introducción

Las explosiones en minas subterráneas de carbón constituyen uno de los riesgos más críticos e impactantes para la industria minera a escala global [1]. El polvo de carbón en suspensión, debido a su elevada inflamabilidad, actúa como el combustible principal en la propagación de la llama, por lo que su mitigación se logra fundamentalmente mediante el proceso de inertización [2], [3]. Esta técnica consiste en la dispersión de un material incombustible para diluir la concentración de materia orgánica y absorber la energía térmica liberada durante un evento de ignición. La caliza (carbonato de calcio, CaCO_3) ha sido el material de referencia universalmente empleado; su eficacia se basa en la dilución física del combustible y en la absorción endotérmica de calor [4]. La dosificación y homogeneidad del agente inerte se validan rutinariamente mediante mediciones de explosividad con equipos como el CDEM-1000, cuyo

principio de funcionamiento se fundamenta en la reflectancia óptica de la mezcla de polvo, lo que introduce una dependencia crítica del color del material utilizado.

A pesar de su adopción extendida, la caliza presenta limitaciones operativas significativas. Su alta higroscopicidad y sensibilidad a la humedad en ambientes subterráneos deterioran propiedades fundamentales como la dispersabilidad y la adhesión a las partículas de carbón, lo que dificulta alcanzar una mezcla homogénea y disminuye la eficacia real de la inertización. En este escenario, el desarrollo de materiales alternativos con propiedades térmicas optimizadas ofrece una supresión de llama más eficiente. Específicamente, se requieren sustancias con mayor capacidad calorífica para responder al flujo térmico por unidad de masa y con estabilidad estructural a temperaturas elevadas para preservar la dispersión.

En este contexto, la hidroxiapatita (HAp, $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{OH})$) emerge como una alternativa prometedora [5]. Sus ventajas se fundamentan en su compatibilidad de reflectancia óptica con los equipos de diagnóstico (CDEM-1000) y en sus propiedades químicas, estructurales y térmicas superiores [6]. La red cristalina de la HAp proporciona mayor resistencia a la humedad, lo que favorece la dispersibilidad y activa un mecanismo de inhibición térmica que combina la absorción de calor con la posible deshidratación endotérmica y la liberación de especies de fosfato a temperaturas elevadas. Asimismo, la versatilidad de sus rutas de síntesis [7], [8] (como la reacción en estado sólido, precipitación en vía húmeda o sol-gel) permite sintonizar la granulometría y la morfología de partícula mediante el control de parámetros como el pH, la temperatura y la relación molar Ca / P. Esta modulación es determinante, pues el área superficial específica condiciona la transferencia de calor y el contacto con el polvo de carbón.

Por consiguiente, el objetivo de esta investigación fue sintetizar hidroxiapatita mediante las rutas de precipitación en vía húmeda y reacción en estado sólido, evaluando sistemáticamente su desempeño como agente inertizante en comparación con la caliza comercial. La caracterización contempló la validación de reflectancia analítica en el equipo CDEM-1000 [9] y la evaluación de sus propiedades físicas y térmicas, con el fin de determinar la viabilidad técnica de la HAp para la mitigación del riesgo de explosión en minería subterránea. Es importante destacar que la revisión bibliográfica realizada no reporta antecedentes sobre la evaluación de agentes inertizantes alternativos a la caliza en ensayos de explosividad de polvo de carbón.

Metodología

Para la síntesis de hidroxiapatita por precipitación en vía húmeda (HAp-VH), se prepararon dos soluciones precursoras: ácido fosfórico (H_3PO_4) a 0,60 M y de hidróxido de calcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) a 1,00 M, dosificadas para garantizar la relación molar estequiométrica de la apatita ($\text{Ca} / \text{P} = 1,67$). La solución de H_3PO_4 se adicionó gota a gota sobre la suspensión de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ mediante agitación magnética constante, asegurando una velocidad de reacción controlada y una mezcla homogénea. Finalizada la adición,

la suspensión se calentó a 90°C durante 1 h bajo agitación continua y, posteriormente, se sometió a un proceso de envejecimiento durante 24 h a temperatura ambiente. El precipitado obtenido se calcinó en una mufla a 800°C durante 3 h, aplicando una rampa de calentamiento de $10^{\circ}\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$.

Para la HAp sintetizada por reacción en estado sólido (HAp-VS), los precursores sólidos $\text{Ca}(\text{OH})_2$ y pentóxido de fósforo (P_2O_5) se dosificaron en masa hasta cumplir la relación molar estequiométrica $\text{Ca} / \text{P} = 1,67$. Los reactivos se homogenizaron mecánicamente en seco con varilla de vidrio, se sometieron a tratamiento térmico a 90°C durante 1 h y se dejaron envejecer por 24 h a temperatura ambiente. Finalmente, la mezcla sólida se sinterizó a 800°C durante 3 h con una rampa térmica de $10^{\circ}\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$.

La caracterización espectroscópica de las muestras sintetizadas se realizó mediante espectrometría de infrarrojo por transformada de Fourier (FTIR), siguiendo los estándares internacionales ASTM E168 [10] y ASTM E1252 [11]. Los espectros se adquirieron en el intervalo de 4000 cm^{-1} a 400 cm^{-1} , con una resolución de 4 cm^{-1} y un mínimo de 32 barridos por muestra, con el fin de identificar las bandas de vibración características de los iones fosfato (PO_4^{3-}) e hidroxilo (OH^-), así como la presencia de carbonatos o fases secundarias residuales.

La evaluación de las propiedades térmicas —conductividad térmica (k) y capacidad calorífica volumétrica ($\rho \cdot C_p$)— se ejecutó en un analizador de propiedades térmicas TEMPOS provisto de una sonda de doble aguja SH-3. Para el ensayo se confeccionaron probetas cilíndricas de 3 cm X 3 cm empleando partículas de HAp con granulometría controlada pasante por malla Tyler N.º 200 ($75 \mu\text{m}$). La sonda SH-3 se insertó asegurando la alineación paralela de las agujas y el contacto térmico continuo con la matriz de polvo, registrando tres réplicas por cada material sintetizado.

Finalmente, las pruebas de explosividad y reflectancia óptica se llevaron a cabo en un medidor CDEM-1000 siguiendo las especificaciones del manual de operación del fabricante [9]. Estas mediciones de inflamabilidad se aplicaron comparativamente tanto a la HAp obtenida por las dos rutas químicas (HAp-VH y HAp-VS) como a la caliza comercial utilizada como material de referencia.

Resultados

El carbón utilizado en los ensayos de explosividad se extrajo de la mina subterránea El Espejo, ubicada en el municipio de Tasco (Boyacá, Colombia). Este yacimiento pertenece al área de reserva especial de la Formación Guaduas, unidad litológica del Cretácico Superior reconocida por albergar importantes secuencias carboníferas de la cuenca del Cordillera Oriental. Este contexto geológico resulta de especial interés para el estudio de carbones humínicos debido a la variabilidad textural y composicional de sus niveles estratigráficos.

De acuerdo con la caracterización petrológica reportada por Ocampo [12], la materia mineral asociada al carbón estudiado está constituida predominantemente por fragmentos de limolitas silíceas y lodolitas carbonosas, con intercalaciones lenticulares de vitrinita, microcuarzo y presencia ocasional de pirita granular fina con tamaños de grano inferiores a $25\ \mu\text{m}$. A partir de sus atributos petrográficos y grado de madurez térmica, el material se clasifica como un carbón bituminoso de alto contenido de materia volátil tipo C (según la norma ASTM D388). Su matriz presenta una estructura anisotrópica y un elevado grado de consolidación mecánica, lo que ratifica las observaciones microtexturales reportadas en la literatura para los mantos de esta formación [12].

Caracterización FTIR: identificación de grupos funcionales en caliza e HAp

El análisis por espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR) se empleó para identificar los grupos funcionales característicos de la caliza (CaCO_3) y de las hidroxiapatitas sintetizadas por vía sólida (HAp-VS) y vía húmeda (HAp-VH), con el fin de confirmar la formación de las fases esperadas y detectar posibles sustituciones o residuos carbonatados derivados de las condiciones de síntesis. Esta técnica permite obtener información sobre los enlaces químicos presentes en el material, mediante la absorción selectiva de radiación infrarroja por los modos vibracionales de los grupos funcionales, generando un espectro que actúa como huella estructural del compuesto.

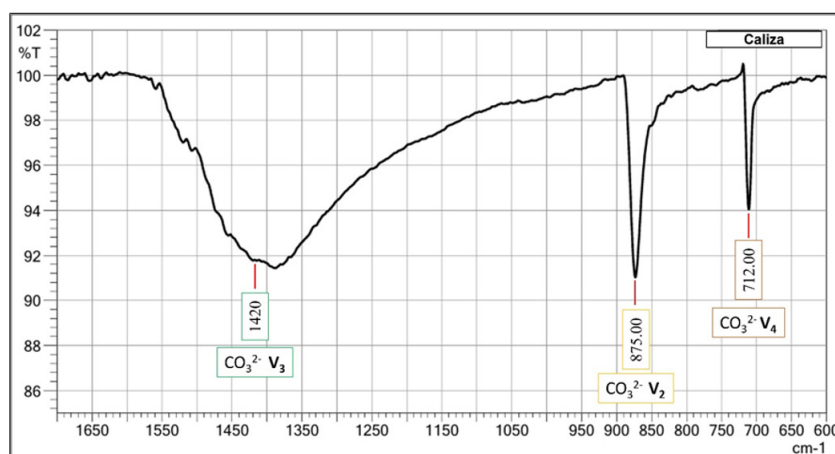


Figura 1: Espectro Infrarrojo con Transformada de Fourier de la Caliza

Fuente: Autores

La Figura 1 muestra el espectro obtenido para la caliza empleada en este trabajo. En dicho espectro se observan las bandas asociadas al ion carbonato (CO_3^{2-}) a $\sim 712\ \text{cm}^{-1}$ correspondiente a la vibración de deformación angular (bending, ν_4) del enlace C—O, así como la absorción aproximadamente a $875\ \text{cm}^{-1}$ relacionada con la deformación angular (ν_2) de la unión C—O, y finalmente, una de las regiones más importantes de la estructura del carbonato de calcio, las cuales aparecen entre $1418\text{--}1430\ \text{cm}^{-1}$, debido a que relaciona la vibración de estiramiento (stretching, ν_3) de la unión C—O.

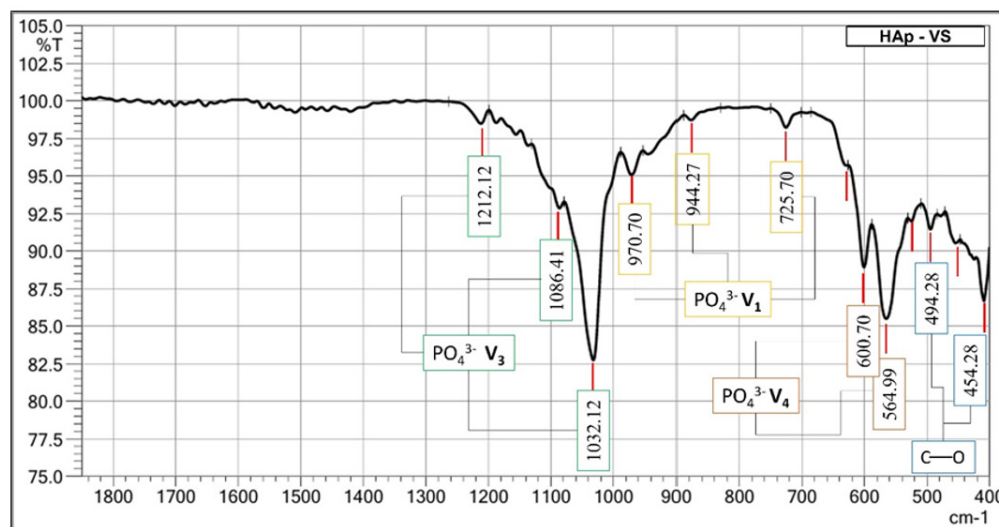


Figura 2: Espectro Infrarrojo con Transformada de Fourier de la Hidroxiapatita _ Vía sólida.

Fuente: Autores

La Figura 2 evidencia regiones que confirman la presencia de hidroxiapatita la cual fue sintetizada por vía sólida: una señal intensa en la región de $\sim 1030\text{--}1220\text{ cm}^{-1}$ asociada al estiramiento asimétrico (v_3) del ion fosfato, una banda en $950\text{--}975\text{ cm}^{-1}$ correspondiente al estiramiento simétrico (v_1), así como las absorciones en 603 y 565 cm^{-1} propias de las deformaciones (v_4) del grupo PO_4^{3-} , y finalmente la región comprendida entre $450\text{--}950\text{ cm}^{-1}$ se relaciona con las vibraciones del enlace C-O.

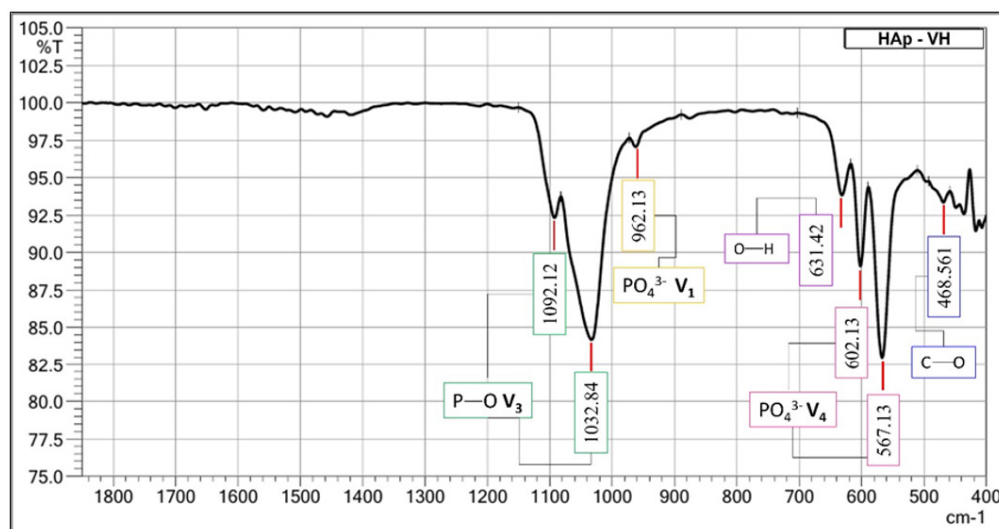


Figura 3: espectro Infrarrojo con Transformada de Fourier de la Hidroxiapatita - Vía húmeda

Fuente: Autores

El espectro de la Figura 3, obtenido para la hidroxiapatita sintetizada por vía húmeda, presenta las bandas características del ion fosfato: una absorción intensa en la región de 1035–1100 cm^{-1} correspondiente al estiramiento asimétrico (ν_3), una señal definida en 960 cm^{-1} asociada al estiramiento simétrico (ν_1), el doblete en 603 y 565 cm^{-1} relacionado con las deformaciones angulares (ν_4), y la banda en $\sim 470 \text{ cm}^{-1}$ atribuida a la vibración del enlace C-O. La nitidez y buena separación de estas señales confirman la presencia de hidroxiapatita.

Pruebas de explosividad e inertización con CDEM-1000

En el presente trabajo se realizaron mediciones de explosividad mediante el analizador óptico CDEM-1000, con el propósito de evaluar comparativamente la capacidad de supresión de llama de los materiales sintetizados frente a la propagación de explosiones por polvo de carbón. Las mediciones se aplicaron a mezclas binarias de polvo de carbón con agentes inertes de caliza comercial (material de referencia), hidroxiapatita obtenida por vía húmeda (HAp-VH) e hidroxiapatita sintetizada por reacción en estado sólido (HAp-VS). Esta comparación permite determinar la viabilidad técnica de la hidroxiapatita como agente inerte alternativo en minería subterránea. Cabe destacar que, en la práctica minera actual, la caliza constituye el único material reglamentado y utilizado operativamente con este fin, debido a su abundancia comercial y efectividad probada en la mitigación de explosiones.

El principio de funcionamiento del CDEM-1000 se basa en la espectroscopía de reflectancia óptica en el espectro visible e infrarrojo cercano. El dispositivo mide la intensidad de la luz reflejada por la superficie de la mezcla homogénea de polvo de carbón y material inerte. A partir de la firma cromática y el contraste de reflectancia entre el combustible (carbón) y el inerte, el algoritmo del equipo determina cuantitativamente la fracción de materia incombustible presente. Esta fracción se contrasta internamente con los umbrales críticos de explosividad calibrados para el tipo de carbón, emitiendo una clasificación dicotómica cualitativa: señal verde para una condición no explosiva (mezcla inerte) y señal roja para una condición explosiva.

Los resultados de los ensayos de explosividad y los porcentajes mínimos de inerte requeridos para la supresión de la propagación de llama se resumen en la Tabla 1.

Inicialmente, se evaluaron las mezclas binarias de caliza y polvo de carbón en relaciones másicas inerte: combustible de 80,0: 20,0, 80,0: 15,0, 90,0: 10,0 y 92,5: 7,5. De estas combinaciones, únicamente la proporción 92,5: 7,5 arrojó una respuesta positiva (señal verde) en el analizador CDEM-1000. De acuerdo con el protocolo de operación del instrumento, este diagnóstico óptico se interpreta como la supresión efectiva de la inflamabilidad y la ausencia de comportamiento explosivo bajo las condiciones de ensayo.

Posteriormente, se repitieron los ensayos sustituyendo la caliza por HAp-VS bajo idénticas proporciones y condiciones experimentales. La mezcla HAp-VS:carbón a la relación 92,5: 7,5 registró del

mismo modo una señal verde en el CDEM-1000, alcanzando el umbral de no explosividad en la misma proporción que el material de referencia. Estos resultados confirman que, bajo criterios estandarizados de preparación e instrumentación, la HAp-VS exhibe una capacidad de inertización equivalente a la caliza comercial.

Tabla 1. Pruebas de explosividad con el equipo CDEM-1000

EVALUACIÓN DEL GRADO DE INERTIZACIÓN			
CARBÓN	CALIZA	PROPORCIÓN (%p/p)	RESPUESTA
20	80	80:20	ROJO
15	85	85:15	ROJO
10	90	90:10	ROJO
7.5	92.5	92.5:7.5	VERDE
CARBÓN	HAp - VS	PROPORCIÓN (%p/p)	VALOR
20	80	80:20	ROJO
15	85	85:15	ROJO
10	90	90:10	ROJO
7.5	92.5	92.5:7.5	VERDE
CARBÓN	HAp - VH	PROPORCIÓN (%p/p)	VALOR
20	80	80:20	ROJO
15	85	85:15	ROJO
10	90	90:10	ROJO
7.5	92.5	92.5:7.5	ROJO
7.0	93	93:7.0	VERDE

Fuente: Autores.

Por último, se evaluó la serie con HAp-VH utilizando el esquema de proporciones inicial. En esta secuencia, la mezcla 92,5: 7,5 mantuvo una respuesta negativa (señal roja), indicando la persistencia del comportamiento explosivo. Ante este hallazgo, se ajustó la dosificación incrementando en un 0,5 % la fracción másica de HAp-VH hasta alcanzar una relación de 93,0: 7,0 (Tabla 1), formulación con la cual se obtuvo la señal verde de supresión de llama.

Este requerimiento adicional de un 0,5 % de inerte en la HAp-VH se atribuye a diferencias microestructurales y cinéticas de transferencia de calor derivadas de la ruta de síntesis. La hidroxiapatita obtenida por precipitación en vía húmeda suele presentar menor cristalinidad y variaciones en el tamaño de cristalino, tal como sugieren las bandas de vibración espectrales en el análisis por FTIR. No obstante, este ligero incremento en la fracción másica demuestra que la HAp-VH alcanza condiciones operativas de estabilidad e inertización plenamente funcionales.

Evaluación térmica de la caliza y de las rutas de síntesis de HAp

La caracterización térmica de la caliza comercial y de la hidroxiapatita sintetizada por reacción en estado sólido (HAp-VS) y precipitación en vía húmeda (HAp-VH) se realizó mediante un analizador de propiedades térmicas TEMPOS. Esta medición permitió determinar experimentalmente la capacidad calorífica volumétrica (C_v) y la conductividad térmica (K), parámetros físicos fundamentales que gobiernan la transferencia de calor y el almacenamiento de energía en los materiales inerte-combustible. Dichas propiedades son determinantes para evaluar la eficiencia de inertización frente a deflagraciones de polvo de carbón, puesto que dictan la tasa de disipación y la cantidad de energía calórica absorbida durante un evento de ignición.

La capacidad calorífica volumétrica (C_v , expresada en $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$ o $\text{J} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$) representa la cantidad de energía requerida para elevar en un kelvin la temperatura de un metro cúbico del material. Un inerte con un valor elevado de C_v actúa como un sumidero térmico eficiente, capaz de absorber una mayor cantidad de la energía liberada por la combustión volátil del carbón sin experimentar incrementos térmicos críticos, amortiguando así el frente de la llama. Por su parte, la conductividad térmica (k , expresada en $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$) cuantifica la tasa de conducción de energía por unidad de área y gradiente térmico. En sistemas particulados, una menor conductividad térmica limita la propagación rápida del calor hacia las partículas combustibles contiguas, favoreciendo la estabilidad térmica de la suspensión y dificultando el autoabastecimiento cinético del frente de onda.

El análisis comparativo de estas propiedades permite precisar el mecanismo de supresión térmica de la hidroxiapatita frente al material de referencia. En la Tabla 2 se presentan los valores experimentales obtenidos para la caliza, la HAp-VS y la HAp-VH.

Tabla 2 Propiedades térmicas de los materiales empleados

PROPIEDADES TÉRMICAS			
MUESTRA	PROPIEDAD	UNIDAD	VALOR
CaCO_3	Capacidad Calorífica (C)	$\text{MJ} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$	1.112
	Conductividad (k)	$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	0.153
HAp VS	Capacidad Calorífica (C)	$\text{MJ} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$	0.805
	Conductividad (k) HAp VS	$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	0.111
HAp VH	Capacidad Calorífica (C)	$\text{MJ} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$	1.010
	Conductividad (k)	$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	0.158

Fuente: Autores.

En términos comparativos, tomando como referencia la caliza comercial, se evidenció que la HAp-VS presentó una reducción del 27,5 % tanto en su capacidad calorífica volumétrica como en su conductividad térmica. A pesar de la menor absorción global de energía, su reducida conductividad térmica representa una ventaja operativa determinante: dificulta el transporte conductivo de calor entre partículas contiguas e impide que la energía liberada durante la ignición local se transfiera con rapidez hacia el combustible vecino. En conjunto, esta respuesta cinética sugiere que la HAp-VS promueve una disipación térmica altamente localizada, lo que restringe eficazmente la expansión del frente de llama.

Por su parte, la HAp-VH registró una capacidad calorífica un 9,2 % menor y una conductividad térmica un 3,3 % superior en relación con la caliza. La ligera disminución en la capacidad calorífica implica que el material absorbe menos calor por unidad de volumen antes de incrementar su temperatura, mientras que el leve incremento en la conductividad refleja una mayor tasa de transferencia de calor, si bien esta variación no resulta estadísticamente significativa ni compromete el desempeño operativo en términos prácticos. En consecuencia, su comportamiento térmico se mantiene en un rango de eficiencia comparable al del agente inerte de referencia.

Conviene señalar que la interrelación exacta entre las propiedades térmicas intrínsecas de un inerte particulado y su firma de reflectancia óptica es un campo de estudio en desarrollo. Por lo tanto, se requiere complementar estas evaluaciones con la caracterización de parámetros microestructurales adicionales —tales como la porosidad intragranular, la distribución de tamaño de cristalino y el área superficial específica (BET)— para alcanzar una mayor certidumbre sobre los mecanismos acoplados de transferencia de calor y reflectancia en el CDEM-1000.

Conclusiones

►El análisis por espectroscopía de infrarrojo por transformada de Fourier (FTIR) confirmó la formación de la fase hidroxiapatita (HAp) en los productos sintetizados por reacción en estado sólido (HAp-VS) y precipitación en vía húmeda (HAp-VH). Los espectros de ambas muestras registraron las bandas de vibración características de los iones fosfato (PO_4^{3-}) e hidroxilo (OH^-). La ausencia de señales asociadas al ion carbonato (CO_3^{2-}), distintivas del material de referencia (CaCO_3), ratifica la pureza de las fases obtenidas sin evidencia de contaminación por carbonatos residuales detectables por esta técnica.

►Las mediciones de propiedades térmicas (TEMPOS) evidenciaron que la HAp-VS presentó los valores más bajos de capacidad calorífica volumétrica ($0,805 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$) y conductividad térmica ($0,111 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$) en comparación con la caliza comercial. Aunque esta combinación implica una menor capacidad de almacenamiento calórico, su baja conductividad actúa como una barrera efectiva para el transporte conductivo de energía entre partículas, conteniendo la propagación local del frente térmico en la mezcla inerte-combustible y reduciendo el riesgo de deflagración.

►La HAp-VH registró una capacidad calorífica un 9,2 % menor y una conductividad térmica un 3,3 % superior en relación con la caliza. A pesar de esta leve tendencia a una mayor transferencia calórica, las diferencias no resultan estadísticamente significativas en el contexto operativo. Su desempeño térmico global permanece dentro de un rango estable y directamente comparable con el material de referencia, validando a la HAp-VH como una opción técnicamente viable para la inertización de polvo de carbón.

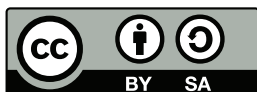
►Los ensayos en el medidor de explosividad por reflectancia CDEM-1000 demostraron que en fracciones de inerte comprendidas entre 80,0 % y 90,0 % (20,0 % a 10,0 % de polvo de carbón), todas las formulaciones mantuvieron una condición explosiva (señal roja). La condición de supresión efectiva de llama (señal verde) se alcanzó al incrementar la fracción inerte a 92,5 % para la HAp-VS (idéntico a la caliza) y a 93,0 % para la HAp-VH. Esto confirma que la hidroxiapatita sintetizada neutraliza la inflamabilidad del polvo de carbón en concentraciones equivalentes a las exigidas para la caliza comercial.

►En conjunto, este estudio demuestra la viabilidad técnica de la hidroxiapatita como agente inerte alternativo para la mitigación del riesgo de explosión en minería subterránea de carbón. La posibilidad de modular la microestructura y las propiedades térmicas mediante la ruta de síntesis (vía húmeda o estado sólido) abre un campo para el diseño de inertizantes de alta especificidad orientados a la gestión de la seguridad minera.

Referencias

- [1] eCFR, "Title 30 of the CFR – Mineral Resources." [Online]. Available: <https://www.ecfr.gov/current/title-30>. Accessed: Apr. 4, 2025.
- [2] K. Baquero, A. Blandón, and J. Molina, "Análisis de los factores que influyen en la explosividad del polvo de carbón en las minas subterráneas," *Ingeniería y Competitividad*, vol. 14, pp. 173–182, 2012.
- [3] Función Pública, "Decreto 1886 de 2015 - Gestor Normativo - Función Pública." [Online]. Available: https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=65325&utm_source=chatgpt.com. Accessed: Dec. 11, 2025.
- [4] Y. Luo, D. Wang, and J. Cheng, "Effects of rock dusting in preventing and reducing intensity of coal mine explosions," *Int. J. Coal Sci. Technol.*, vol. 4, no. 2, pp. 102–109, Jun. 2017, doi: <https://doi.org/10.1007/S40789-017-0168-Z>.
- [5] L. O. Ahmed and R. A. Omer, "Hydroxyapatite biomaterials: A comprehensive review of their properties, structures, clinical applications, and producing techniques," *Rev. Inorg. Chem.*, vol. 44, no. 4, pp. 599–618, Nov. 2024, doi: <https://doi.org/10.1515/REVIC-2024-0018/XML>.
- [6] MatWeb, "Recurso de información de materiales en línea - MatWeb." [Online]. Available: <https://www.matweb.com/>. Accessed: May 5, 2025.
- [7] L. G. Sequeda, J. M. Díaz, S. J. Gutiérrez, S. J. Perdomo, and O. L. Gómez, "Obtención de hidroxiapatita sintética por tres métodos diferentes y su caracterización para ser utilizada como sustituto óseo," *Revista Colombiana*

- de Ciencias Químico-Farmacéuticas*, vol. 41, no. 1, pp. 50–66, 2012. [Online]. Available: http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0034-74182012000100004&lng=en&nrm=iso&tlng=es. Accessed: May 5, 2025
- [8] D. E. Juárez Robles *et al.*, “Síntesis de nano-hidroxiapatita por los métodos sol-gel y coprecipitación,” 2017. [Online]. Available: <https://hdl.handle.net/11191/8376>. Accessed: May 5, 2025.
- [9] Sensidyne, *Operation Manual*. USA, 2011. [Online]. Available: <https://www.sensidyne.com>
- [10] ASTM, “Practices for General Techniques of Infrared Quantitative Analysis,” Apr. 2016, doi: <https://doi.org/10.1520/E0168-16>
- [11] ASTM, “Practice for General Techniques for Obtaining Infrared Spectra for Qualitative Analysis,” Apr. 2021, doi: <https://doi.org/10.1520/E1252-98R21>
- [12] I. Wilder and A. O. Ochoa, “Caracterización de las Rocas Carbón de la Formación Guaduas y Calizas de la Formación Tibasosa, Usando el Método de Ultrasonido y Susceptibilidad Magnética,” master’s thesis, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia (UPTC), 2021.





CONTENIDO

- Alcance y política editorial de la revista
- Tipos de artículos aceptados
- Formato del artículo
- Envío de artículos
- Procedimiento para la publicación
- Arbitraje de artículos
- Contacto

ALCANCE Y POLÍTICA EDITORIAL DE LA REVISTA

La revista *Tecnura* es una publicación institucional de la Facultad Tecnológica de la Universidad Francisco José de Caldas, de carácter científico-tecnológico con periodicidad trimestral, que se publica los meses de enero, abril, julio y octubre. Su primer número apareció en el segundo semestre del año 1997 y hasta la fecha ha mantenido su regularidad.

Las áreas temáticas de interés de la revista *Tecnura* están enfocadas a todos los campos de la ingeniería, como la electrónica, telecomunicaciones, electricidad, sistemas, industrial, mecánica, catastral, civil, ambiental, entre otras. Sin embargo, no se restringe únicamente a estas, también tienen cabida los temas de educación y salud, siempre y cuando estén relacionados con la ingeniería. La revista publica únicamente artículos de investigación científica y tecnológica, de reflexión y de revisión. En consecuencia, durante la fase de evaluación editorial inicial se rechazarán los artículos cortos y reportes de caso.

La revista *Tecnura* está dirigida a docentes, investigadores, estudiantes y profesionales interesados en la actualización permanente de sus conocimientos y el seguimiento de los procesos de investigación científico-tecnológica, en el campo de las ingenierías. Tiene como misión divulgar resultados de proyectos de investigación realizados en el área de las ingenierías, a través de la publicación de artículos originales e inéditos, realizados por académicos y profesionales pertenecientes a instituciones nacionales o extranjeras del orden público o privado. Los artículos presentados deben ser trabajos inéditos escritos en español o inglés; sin embargo, tendrán preferencia los artículos que muestren conceptos innovadores de gran interés, que traten sobre asuntos relacionados con el objetivo y cobertura temática de la revista.



Instrucciones para los autores

<https://revistas.udistrital.edu.co/index.php/Tecnura/about/submissions>

Tecnura es una publicación de carácter académico indexada en los Índices Regionales Scielo Colombia (Colombia) y Redalyc (México), además de las siguientes bases bibliográficas: INSPEC del Institution of Engineering and Technology (Inglaterra), Fuente Académica Premier de EBSCO (Estados Unidos), CABI (Inglaterra), Index Copernicus (Polonia), Informe Académico de Gale Cengage Learning (México), Periódica de la Universidad Nacional Autónoma de México (México), Oceanet (España) y Dialnet de la Universidad de la Rioja (España). También hace parte de los siguientes directorios: Sistema Regional de Información en Línea para Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal Latindex (México), Índice Bibliográfico Actualidad Iberoamericana (Chile), e-Revistas (España), DOAJ (Suecia), Ulrich de Proquest (Estados Unidos).

Tecnura es una revista arbitrada mediante un proceso de revisión entre pares de doble ciego. La periodicidad de la conformación de sus comités Científico y Editorial está sujeta a la publicación de artículos en revistas indexadas internacionalmente por parte de sus respectivos miembros.

La Universidad Distrital Francisco José de Caldas, sus directivas, el Editor, el Comité Editorial y Científico no son responsables por la opinión y criterios expresados en el contenido de los artículos y estos se publican bajo la exclusiva responsabilidad de los autores y no necesariamente reflejan el pensamiento del Comité Editorial.

La revista Tecnura se edita exclusivamente en formato digital y se publica en su página web: <http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/Tecnura>

TIPOS DE ARTÍCULOS ACEPTADOS

De acuerdo con la clasificación del Índice Nacional de Publicaciones Científicas y Tecnológicas (Publindex-Colciencias), la revista Tecnura recibe postulaciones de artículos inéditos de los siguientes tipos:

Artículos de investigación científica y tecnológica: documento que presenta, de manera detallada, los resultados originales de proyectos de investigación. La estructura generalmente utilizada contiene cuatro apartes importantes: introducción, metodología, resultados y conclusiones.

Artículo de revisión: documento resultado de una investigación donde se analizan, sistematizan e integran los resultados de las investigaciones publicadas o no publicadas, sobre un campo en ciencia o tecnología, con el fin de dar cuenta de los avances y las tendencias de desarrollo. Se caracteriza por presentar una cuidadosa revisión bibliográfica de al menos 50 referencias.



FORMATO DEL ARTÍCULO

Del lenguaje y estilo apropiado para la redacción de artículos

- Deben emplearse estructuras de oraciones simples, evitando las que sean demasiado largas o complejas.
- El vocabulario empleado debe ser básico y común. Los términos técnicos deben explicarse brevemente; asimismo, el significado de las siglas debe presentarse la primera vez que estas aparecen en el texto.
- Los autores son responsables de que su trabajo sea conducido de una manera profesional y ética.

De la extensión de los documentos

Los artículos no deben tener una extensión de más de 25 páginas en tamaño carta y a doble espacio, con márgenes simétricas de 3 cm. Solo en el caso de los artículos de revisión las 25 páginas no incluyen las referencias bibliográficas.

Del formato de presentación

Los artículos presentados deben ser trabajos inéditos escritos en español o inglés y deben digitarse en Microsoft Word (2003 en adelante), cumpliendo con las siguientes indicaciones:

Letra *Times New Roman* de 12 puntos (a excepción de que se requiera lo contrario para algunos apartados).

- Una columna a doble espacio.
- Todas las márgenes de 3 cm.
- Los párrafos se justifican, y no debe haber espacio entre los consecutivos.
- No incluir saltos de página o finales de sección.
- Si se desea resaltar palabras o frases del texto, no usar letra negrita sino letra cursiva.
- Los decimales se deben señalar con coma (,) y no con un punto.
- Los millares y millones se deben señalar con un espacio fino.
- Evitar las notas de pie de página.
- Se debe utilizar nomenclatura arábica hasta el tercer nivel únicamente.



De la estructura del documento

Los trabajos deben tener la siguiente estructura y cumplir con los siguientes requisitos:

Composición de un artículo

Todos los artículos remitidos para su evaluación y posible publicación por parte de la revista *Tecnura* deben tener por lo menos los siguientes componentes:

- Título en español e inglés.
- Información de los autores.
- Resumen en español e inglés.
- Palabras clave en español e inglés.
- Introducción.
- Conclusiones.
- Trabajo futuro (opcional).
- Agradecimientos (opcional).
- Referencias bibliográficas.

Si el artículo es de investigación científica y tecnológica deben tener, además de lo anterior, los siguientes componentes:

- Metodología.
- Resultados.
- Financiamiento.

Título

Título El título del artículo deberá ser corto o dividido en título y subtítulo, atractivo para el lector potencial y escrito en mayúscula sostenida. Este debe aparecer centrado entre las márgenes, escrito con letra *Times New Roman*, en negrita, tamaño de fuente 18. El título del artículo debe ir en español e inglés separado por un espacio doble. Máximo 20 palabras.



Autores

Después del título debe escribirse el (los) nombre(s) completo(s) del (los) autor(es), acompañado de los datos biográficos básicos: título de pregrado, título de posgrado, ocupación o cargo, afiliación institucional (institución donde labora), dependencia, ciudad, país y correo electrónico. La información anterior debe ir inmediatamente debajo del nombre del autor.

Resumen

Debe establecer el objetivo y alcance del trabajo, una descripción clara y concisa de la metodología, los resultados y las conclusiones obtenidas. Máximo 250 palabras.

Palabras clave

Debe escogerse entre tres y diez palabras clave, escritas en español con letra *Times New Roman*, en negrita y cursiva.

Las palabras clave deben estar escritas en orden alfabético y ser de uso estandarizado, para lo cual se sugiere utilizar bases de datos internacionales según el área del conocimiento. Por ejemplo, en el área de Eléctrica y Electrónica se sugiere utilizar el tesoro de la UNESCO que se pueden encontrar en la página: <http://databases.unesco.org/thessp>.

Abstract

Debe ser una traducción correcta y precisa al idioma inglés del texto que aparece en el resumen en español.

Keywords

Debe ser una traducción correcta y precisa al idioma inglés de la lista de palabras clave en español. Las *keywords* deben estar escritas en el orden de las palabras clave y ser de uso estandarizado, para lo cual se sugiere utilizar bases de datos internacionales según el área del conocimiento. Por ejemplo, en el área de Eléctrica y Electrónica se sugiere utilizar los Tesoros de la IEEE y/o World Bank que se pueden encontrar en las siguientes páginas respectivamente: http://www.ieee.org/documents/2009Taxonomy_v101.pdf, <http://multites.net/mtsql/wb/site/default.asp>

Introducción

Debe describir el planteamiento general del trabajo, así como contexto, antecedentes, estado de arte de la temática abordada, objetivo y posible alcance del trabajo.



Metodología

La redacción de este apartado debe permitir a cualquier profesional especializado en el tema replicar la investigación.

Resultados

Explicación e interpretación de los hallazgos. Si es necesario, se puede presentar una discusión breve y enfocada a la interpretación de los resultados.

Conclusiones

Implicación de los resultados y su relación con el objetivo propuesto.

Financiamiento

Mencionar la investigación asociada de la cual se derivó el artículo y la entidad que avaló y financió dicha investigación.

Agradecimientos

Preferiblemente deben ser breves y deben incluir los aportes esenciales para el desarrollo del trabajo.

Ecuaciones

Deben aparecer centradas con respecto al texto principal. Las ecuaciones deben ser referenciadas con números consecutivos (escritos entre paréntesis cerca al margen derecho). Las ecuaciones se citan en el texto principal empleando la palabra ecuación y seguida del número entre paréntesis. Las ecuaciones deben ser elaboradas en un editor de ecuaciones apropiado y compatible con el paquete de software InDesign, por ejemplo, el editor de ecuaciones de Windows.

Tablas

Para el caso de realización de tablas se recomienda que estas no sean insertadas como imágenes, considerando que en este formato no pueden ser modificadas. El encabezado de cada tabla debe incluir la palabra Tabla (en negrita) seguida del número consecutivo correspondiente y de un breve nombre de la tabla. El encabezado debe estar escrito con letra Times New Roman, en cursiva y tamaño de fuente 9.

No se presentan cuadros sino tablas y estas se deben levantar automáticamente desde el procesador de textos. Las tablas deben ir nombradas y referenciadas en el artículo, en estricto orden. Toda tabla debe tener en su parte inferior la fuente de la que fue tomada, o mencionar que es autoría de los autores si es el caso.



Figuras

Todas las figuras o fotografías deben enviarse en formato PNG o TIFF con una resolución mínima de 300 DPI, adaptadas a escala de grises.

El pie o rótulo de cada figura debe incluir la palabra **Figura** (en negrita) seguida del número consecutivo correspondiente y de una breve descripción del contenido de la figura. El pie de figura debe estar escrito con letra Times New Roman, en cursiva y tamaño de fuente 9. Las figuras deben ir nombradas y referenciadas en el artículo, en estricto orden. Toda figura debe tener también la fuente de la que fue tomada, o mencionar que es autoría de los autores si es el caso.

Símbolos

Los símbolos de las constantes, variables y funciones en letras latinas o griegas –incluidos en las ecuaciones– deben ir en cursiva; los símbolos matemáticos y los números no van en cursiva. Se deben identificar los símbolos inmediatamente después de la ecuación. Se deben utilizar las unidades, dimensiones y símbolos del sistema internacional.

Cuando se empleen siglas o abreviaturas, se debe anotar primero la equivalencia completa, seguida de la sigla o abreviatura correspondiente entre paréntesis y en lo subsecuente se escribe solo la sigla o abreviatura respectiva.

Referencias bibliográficas

Todas las referencias bibliográficas citadas dentro del texto se encuentran listadas en la sección Referencias. El formato en que se cita es el establecido por el Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). Puede consultar los materiales que pone a disposición el sistema de bibliotecas de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas o el documento oficial de la IEEE

ENVÍO DE ARTÍCULOS

Los autores deben enviar sus artículos a través de la aplicación para tal fin del Open Journal System en formato digital, adjuntando la carta de presentación y el formato de información artículo-autores.

Carta de presentación

El artículo debe ir acompañado de una carta de presentación dirigida al director y editor de la revista, Ing. Lely Adriana Luengas Contreras, donde incluya:

- Solicitud expresa de considerar su artículo para publicarlo en la revista *Tecnura*.



- Título completo del trabajo.
- Nombres completos de todos los autores del trabajo.
- Certificación de la originalidad y el carácter inédito del trabajo.
- Exclusividad de su remisión a la revista Tecnura.
- Confirmación de la autoría con la firma de todos los autores.

Esta carta deberá estar firmada por todos los autores, escanearse y enviarse junto con los demás documentos solicitados.

Formato de información artículo-autores

El artículo además debe ir acompañado de un formato de información sobre el artículo y sus autores, el cual se puede descargar de la página web de la revista Tecnura: <http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/Tecnura>, en la sección “Formatos y Documentos”. Es importante completar todos los campos de información solicitados, algunos de ellos tienen comentarios para aclarar mejor lo que se está solicitando. El formato no debe escanearse.

Artículo

Artículo en formato digital (Word 2003 en adelante) que cumpla con todas las normas de presentación descritas en el capítulo 3, “Formato del artículo”, de la presente en las instrucciones a los autores.

PROCEDIMIENTO PARA LA PUBLICACIÓN

El procedimiento que sigue la revista Tecnura para la evaluación y posible publicación de los trabajos enviados por los autores es el siguiente en orden cronológico:

1. Envío del artículo acompañado de la carta de presentación y el formato de información por parte de los autores.
2. Notificación al autor de correspondencia de la recepción del artículo.
3. Verificación del tema del artículo con respecto a las áreas de interés de la revista.
4. Verificación de las normas de presentación por parte del monitor de la revista.
5. Notificación al autor de correspondencia de la evaluación de las normas de presentación.
6. Envío de las correcciones realizadas por los autores con respecto a la evaluación de las normas de presentación.



7. Envío del artículo a los árbitros seleccionados.
8. Notificación del inicio del proceso de arbitraje del artículo.
9. Notificación a los autores de la decisión tomada por el Comité Editorial y de las evaluaciones hechas por los árbitros.
10. Envío de las correcciones realizadas por los autores con respecto a las evaluaciones de los árbitros.
11. Estudio de la versión final del artículo y de las evaluaciones de los árbitros por parte del Comité Editorial.
12. Envío por parte de los autores de la carta de cesión de derechos al editor de la revista.
13. Envío de la versión con corrección de estilo y diagramada a los autores.
14. Verificación de errores y aprobación final de la versión con corrección de estilo y diagramada por parte de los autores.
15. Publicación del artículo en el número correspondiente de la revista Tecnura.
16. Notificación a los autores de la publicación del número de interés.
17. Envío de un ejemplar de la revista a cada autor del artículo publicado.

PROCESO DE ARBITRAJE DE ARTÍCULOS

Considerando la periodicidad trimestral de la revista, el Comité Editorial realiza cuatro convocatorias anuales para la recepción de artículos, aproximadamente en los meses de febrero, mayo, agosto y noviembre. Los artículos serán recibidos hasta la fecha máxima establecida en cada convocatoria.

Una vez recibidos los artículos el monitor de la revista realizará una primera evaluación de forma para verificar que cumplan con todos los elementos mencionados en esta guía de instrucciones a los autores. Luego de recibir nuevamente el artículo con las correcciones de forma solicitadas por el monitor de la revista, este será sometido a evaluación por tres pares académicos (paulatinamente se espera incorporar un mayor número de pares externos que participen en el proceso).

Cada artículo remitido a la revista Tecnura es revisado por dos pares académicos externos a la institución de los autores, mediante un proceso de “revisión entre pares” (*Peer-review*) de doble-ciego, garantizando el anonimato de los autores y evaluadores; se considera confidencial todo trabajo recibido y así se le exige a sus evaluadores.



Instrucciones para los autores

<https://revistas.udistrital.edu.co/index.php/Tecnura/about/submissions>

Las posibles conclusiones de los resultados de la evaluación por parte de los árbitros son únicamente tres: publicar el artículo sin modificaciones, publicar el artículo con modificaciones o no publicar el artículo.

Posteriormente, el Comité Editorial toma la decisión de publicar o no los artículos, con base en los resultados de las evaluaciones realizadas por los árbitros asignados. En caso de existir contradicciones en las evaluaciones con respecto a la publicación de un artículo, el Comité Editorial enviará el artículo a un tercer árbitro y se inclinará por las dos evaluaciones que tengan el mismo concepto respecto a la publicación del artículo.

En cada convocatoria el autor de correspondencia debe sugerir al menos cuatro posibles evaluadores externos a su institución laboral, los cuales deben ser especialistas en el tema específico del artículo remitido, tener al menos maestría y por lo menos dos deben ser internacionales. Los posibles evaluadores pueden pertenecer a una universidad o industria, pública o privada; de estos se debe proporcionar el nombre completo, su formación académica más alta, su afiliación institucional y su correo electrónico. Estos cuatro potenciales evaluadores serán analizados por el Comité Editorial a fin de ampliar la base de datos de los árbitros de la revista Tecnura.

El Comité Editorial de la revista Tecnura se reserva los derechos de impresión, reproducción total o parcial del artículo, así como el de aceptarlo o rechazarlo. Igualmente, se reserva el derecho de hacer cualquier modificación editorial que estime conveniente; en tal caso el autor recibirá por escrito recomendaciones de los evaluadores. Si las acepta, deberá entregar el artículo con los ajustes sugeridos dentro de las fechas fijadas por la revista para garantizar su publicación dentro del número programado.

CONTACTO

Para cualquier solicitud de información adicional puede comunicarse a través del correo electrónico de la revista Tecnura: tecnura@udistrital.edu.co, tecnura@gmail.com, o por mensajería con el Ing. Lely Adriana Luengas Contreras, Director y Editor de la revista Tecnura, a la dirección:

Revista Tecnura

Sala de Revistas, Bloque 5, Oficina 305. Facultad Tecnológica

Universidad Distrital Francisco José de Caldas Transversal 70 B N. 73 a 35 sur

Teléfono: 571 – 3239300 Extensión: 5003

Celular: 57–3153614852

Bogotá D.C., Colombia

Email: tecnura.ud@correo.udistrital.edu.co, tecnura@gmail.com

Página web: <https://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/Tecnura>



CONTENT

- Scope and editorial policy of the journal
- Type of accepted articles
- Article format
- Article submission
- Publication procedure
- Article arbitration
- Contact

Tecnura journal is an institutional publication of the Faculty of Technology from University Francisco José de Caldas. It is a scientific and technological publication with quarterly periodicity, which is published in January, April, July and October. The first issue appeared in the second semester of 1997 and up to now it has maintained its regularity.

The areas of interest of Tecnura journal are focused on all engineering fields such as electronics, telecommunications, electricity, systems, industrial, mechanics, cadastral, civil, environmental, among others. However, it is not restricted to those; it also has room for education and health issues, as long as they are related to engineering. The journal will only publish concerning scientific and technological research, reflection and revision. In consequence, during the initial editorial evaluation, short articles and case reports will be rejected.

Tecnura Journal is addressed for professors, researchers, students and professionals interested in permanent update of their knowledge and follow-up of scientific-technologic processes in the field of engineering. Tecnura Journal has as mission to disseminate results of research projects in the areas of engineering, through the publication of original and unpublished articles, conducted by academics and professionals accredited by public or private national or foreign institutions. Articles submitted to Tecnura journal must be unpublished works written in Spanish or English; nevertheless, preference will be given to articles that show innovative concepts of great interest, related to the objective and scope of the journal.

Tecnura is an academic publication indexed in the Regional Index Scielo Colombia (Colombia) and Redalyc (México); as well as of the following bibliographic databases: INSPEC of the Institution of Engineering and Technology (England), Fuente Académica Premier of EBSCO (United States), CABI (England), Index Copernicus (Poland), Informe Académico of Gale Cengage Learning (México), Periódica from the Universidad Nacional Autónoma de México (México), Oceanet (Spain) and Dialnet from the



Instructions for authors

<https://revistas.udistrital.edu.co/index.php/Tecnura/about/submissions>

Universidad de la Rioja (Spain). It is also part of the following directories: Online Regional Information System for Scientific journals from Latin America, Caribbean, Spain and Portugal Latindex (México), Bibliographic Index Actualidad Iberoamericana (Chile), e-Revistas (Spain), DOAJ (Sweden) and Ulrich of Proquest (United States).

Tecnura is a journal arbitrated by a revision process among double blind peers. The schedule of the conformation of its scientific and editorial committee is subject to the publication of articles in internationally indexed journals by their members.

District University Francisco José de Caldas, its directors, the editor, the editorial and scientific committee are not responsible for the opinions and the criteria expressed in the content of the articles and they are published under the exclusive responsibility of the authors and do not necessarily reflect the ideas of the editorial committee.

Tecnura journal is published exclusively in digital format and is available on its website: <http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/Tecnura/index>

TYPE OF ARTICLES ACCEPTED

According to the classification of the Scientific and Technological Publications National Index (Publindex-Colciencias), Tecnura journal receives nominations of unpublished articles on the following topics:

- **Scientific and technological research articles:** document that presents, in a detailed manner, the original results of research projects. The generally used structure contains four main parts: introduction, methodology, results and conclusions.
- **Reflection articles:** document that presents research results from an analytic, interpretative or critic perspective from the author, dealing with a specific topic and adopting original sources.
- **Review article:** document that results from a research where the results of published or unpublished research on a science or technology field are analyzed, systematized and integrated, in order to state the advances and tendencies in development. It is characterized for presenting a careful bibliographical review of at least 50 references.

ARTICLE FORMAT

About the appropriate language and style for articles writing

- Authors must use simple sentence structures, avoiding those too long or complex.



Instructions for authors

<https://revistas.udistrital.edu.co/index.php/Tecnura/about/submissions>

- The vocabulary used must be basic and common. Technical language must be briefly explained; also, the meaning of the acronyms must be given the first time they appear in the text.
- The authors are responsible for their work to be conducted in a professional and ethic manner.

About the length of articles

The articles should not exceed 25 pages in letter size and double space, with symmetric margins of 3 cm. Only in the case of review articles, these 25 pages do not include references.

About the presentation format

Submitted articles must be unpublished works written in Spanish or English, and must be typed in Microsoft Word (2003 and beyond), complying with the following indications:

- *Times New Roman* letter, 12 point (except it is required for some sections).
- One column, double-spaced.
- All the margins 3 cm.
- Paragraphs should be justified without spaces between consecutives and without cutting words.
- Do not include page breaks or section finals.
- If you want to emphasize words or phrases from the text, do not use bold letters but italic.
- Decimals should be pointed with comma (,) and not with period (.).
- Thousands and millions should be pointed with a fine space.
- Avoid footnotes.
- Arabic nomenclature must be used only until the third level.

About the article structure

The papers must have the following structure and comply with the following requirements:

Composition of an article

All the articles submitted for evaluation and possible publication by the Tecnura Journal must have at least the following components:

- Title in Spanish and English.
- Information about the authors.



- Abstract in Spanish and English.
- Key words in Spanish and English.
- Introduction.
- Conclusions.
- Future work (optional).
- Acknowledgements (optional).
- Bibliographical references.

If the article is related to scientific and technological research must have, in addition to the above, the following components:

- Methodology.
- Results.
- Financing.

Title

The title of the article must be short or divided in title and subtitle, attractive for the potential reader and written in capital letters. It should appear centered between the margins, written in *Times New Roman* letter, in bold, font size 18. The title of the article has to be in Spanish and English separated by double space. Maximum 20 words.

Authors

After the title the complete name(s) of the author(s) must be written, with their basic biographical data: undergraduate degree, graduate degree, occupation or position, institutional affiliation (institution where they work), dependency, city, country and e-mail. The above information must be immediately below the author's name.

Abstract

The scope and purpose of the work must be established giving a clear and concise description of the methodology, results presented and the conclusions obtained. Maximum of 250 words.

Keywords

Between three and ten keywords must be chosen, written in English with *Times New Roman* letter in bold and italic.



Key words must be written in alphabetic order and must be as standard as possible, for which it is suggested the use of international databases according to the area of knowledge. For example, in the area of Electrics and Electronics it is suggested to use the IEEE thesaurus and World Bank thesaurus that can be accessed at the following web pages respectively: http://www.ieee.org/documents/2009Taxonomy_v101.pdf, <http://multites.net/mtsql/wb/site/default.asp>

Abstract in Spanish

Translation to the Spanish language of the text that appears in the abstract, it must be correct and precise.

Keywords in Spanish

Translation to the English language of the keywords in Spanish, they must be correct and precise.

Keywords must be written in the order of the English version and must be as standard as possible, for which it is suggested the use of international databases according to the area of knowledge. For example, in the area of Electrics and Electronics it is suggested to use the UNESCO thesaurus that can be found at the following web pages: <http://databases.unesco.org/thessp>

Introduction

The general idea of the work must be described, its context, backgrounds, state of the art of the topic, objectives and possible scope of the work.

Methodology

The writing of this part must allow any specialized professional in the topic to replicate the research.

Results

Explanation and interpretation of the findings. If necessary, a brief discussion focused on the interpretation of the results can be presented.

Conclusions

Implication of the results and their relation to the proposed objective.

Financing

Mention the associated research from which the article was derived and the entity that endorsed and financed the research.



Acknowledgments

They should preferably be brief and include the essential contributions for the development of the paper.

Equations

Equations must appear centered with respect to the main text. They must be referenced with consecutive numbers (written in parenthesis close to the right margin). Equations are cited in the main text employing the word equation, and followed by the number in parenthesis. Equations must be made in an appropriate equation editor and compatible with "InDesign" software, as for example the equation editor of Windows.

Tables

In the case of implementation of tables, it is recommended that these are not inserted as images, considering that in that format they cannot be modified. The title of each table must include the word table (in italic) followed by the corresponding consecutive number and a brief name of the table. The heading must be written in TNR letter, italic and font size 9.

Charts are not presented but tables and they should be automatically raised from the text processor. Tables should be named and referenced in the article, in strict order. Every table must have at the bottom the source from which it was taken, or to mention self-authorship if it is the case.

Figures

All the figures or pictures have to be sent in JPG or PNG format with a minimum resolution of 300 DPI, adapted to gray scale.

The footnote or name of each figure must include the word figure (in italic) followed by the corresponding consecutive number and a brief description of the content of the figure. The footnote of the figure must be written in Times New Roman letter, italic and font size 9. Figures must be named and referenced in the article, in strict order. Every figure must have at the bottom the source from which it was taken, or to mention self-authorship if it is the case.

Symbols

The symbols of the constants, variables and functions in Latin or Greek letters –included in the equations- must be in italic; the mathematical symbols and the numbers do not go in italic. The symbols must be identified immediately after the equation. Units, dimensions and symbols of the international system must be used.



When using acronyms or abbreviations, the complete equivalence should be written first, followed by the corresponding acronym or abbreviation in parenthesis and from there it is only written the respective acronym or abbreviation.

Bibliographic references

All bibliographic references cited in the text must be listed in the References section. Citations must follow the IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) format.

You may consult the materials provided by the Francisco José de Caldas District University Library System or the official IEEE documentation.

ARTICLE SUBMISSION

Authors must submit their articles through the application Open Journal System in digital format, attaching the cover letter and the article-authors format.

Cover letter

The article must be submitted with a cover letter addressed to the director and editor of the journal, Engineer Lely Adriana Luengas Contreras, including:

- Specific request to consider your article to be published in Tecnura journal.
- Full title of the article.
- Full names of all the authors of the paper.
- Certification of the originality and unpublished character of the paper.
- Exclusivity of submission to Tecnura journal.
- Authoring confirmation with signature of all the authors.

This letter must be signed by all the authors, scanned and sent with the remaining requested documents.

Article-authors information format

The article has to be submitted with an information format about the article and its authors which can be downloaded from the web page of Tecnura journal <http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/Tecnura/index>, in the section "Forms and Documents". It is important to complete all the fields of information requested, some of them have comments to clarify better what is being requested. The format must not be scanned.



Article

Article in digital format (Word 2003 and later editions) that complies with all the presentation rules described in chapter three, "Article structure", of this guide of instructions for authors.

PUBLICATION PROCEDURE

The procedure to be followed by Tecnura journal for the evaluation and possible publication of the papers sent by the authors is the following in chronological order:

1. Delivery of the article with the cover letter and the information format by the authors.
2. Notification to the author about the reception of the article.
3. Verification of the presentation rules by the monitor of the journal.
4. Notification to the author about the evaluation of the presentation rules.
5. Submission of corrections made by the authors related to the evaluation of presentation rules.
6. Submission of the articles to the selected arbitrators.
7. Notification of the beginning of the arbitration process of the article.
8. Notification to the authors about the decision made by the editorial committee, and about the evaluations made by the arbitrators.
9. Delivery of the corrections made by the authors with respect to the evaluations made by the arbitrators.
10. Study of the final version of the article and the evaluations of the arbitrators by the editorial committee.
11. Delivery by the authors of the letter that surrenders right to the editor of the journal.
12. Submission of the version with style corrections and diagrammed to the authors.
13. Verification of errors and final approval of the version with style corrections and diagrammed by the authors.
14. Publication of the article in the corresponding number of Tecnura journal.
15. Notification to the authors of the number of interest.
16. Delivery of a copy of the journal to each one of the authors of the published article.



ARTICLE ARBITRATION PROCESS

Considering the quarterly periodicity of the journal, the Editorial Committee makes four calls every year for the submission of articles, approximately in the months of February, May, August and November. The articles will be received until the date established in the call.

Once received the articles, the monitor of the journal will make an initial form evaluation to verify the completion of the elements mentioned in this guide of instructions to authors. After receiving again the article with the requested corrections by the journal's monitor, the paper will be submitted to evaluation by three academic peers (through time it is expected to include more external peers to participate in the process).

Each article sent to Tecnura journal is checked by two expert academic peers external to the institution of the authors, by a process of "*Peer-review*" of double blind, guaranteeing the anonymity of authors and evaluators; every paper sent is considered confidential and so it is demanded to evaluators.

Possible conclusions of the result of the evaluation by the judges are only three: publish the article without modifications, publish the article with modifications and not publish the article.

Subsequently, the Editorial Committee takes the decision to publish or not the articles, based on the results of the evaluations made by the assigned arbitrators. In case of contradictions in the evaluations with respect to the publication of an article, the editorial committee will send the article to a third peer and will be inclined for the two evaluations that have the same concept with respect to the publication of the article.

In each call the main author must suggest at least four possible external arbitrators to his work institution evaluators, who must be specialists in the specific topic of the article sent and must have at least Masters level, and at least two must to be international. Potential evaluators can belong to a university or industry, public or private; their complete names must be provided, highest academic formation, institutional affiliation and e-mail. The editorial committee will analyze these four potential evaluators in order to enrich the database of arbitrators of Tecnura journal.

The Editorial Committee of Tecnura journal reserves the right to print, reproduce total or partially the article, as the right to accept or reject it. In the same way, it has the right to make any editorial modification that considers necessary; in this case the author will receive written recommendations from the evaluators. If accepted, authors must deliver the article with the suggested adjustments within the dates given by the journal to guarantee its publication in the programmed number.



UNIVERSIDAD DISTRITAL
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

Instructions for authors

<https://revistas.udistrital.edu.co/index.php/Tecnura/about/submissions>

CONTACT

For any additional information request, please send an e-mail to Tecnura journal tecnura@udistrital.edu.co, tecnura@gmail.com or by mail to Lely Adriana Luengas Contreras, Director and Publisher of Tecnura Journal, to the following address:

Tecnura Journal

Journals Room, Block 5, Office 305. Faculty of Technology

Universidad Distrital Francisco José de Caldas Transversal 70 B N. 73 a 35 sur

Phone: 571-3239300 Extension: 5003

Mobile: 57-3153614852

Bogotá D.C., Colombia

Email: tecnura.ud@correo.udistrital.edu.co, tecnura@gmail.com

Web page: <https://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/Tecnura/index>