



Biología-Química-Física
Matemática-Estadística



TECNOCIENCIA

Volumen 28 No. 2

ISSN L 2415-0940



Revista de la Facultad De Ciencias Naturales, Exactas y Tecnología
Universidad De Panamá
Julio - Diciembre 2026

TECNOCIENCIA

Volumen 28, No. 2
Julio – Diciembre 2026

Publicación Semestral

UNIVERSIDAD DE PANAMÁ
FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES,
EXACTAS Y TECNOLOGÍA



Autoridades de la Universidad de Panamá

Eduardo Flores Castro
Rector

José Emilio Moreno
Vicerrector Académico

Jaime Javier Gutiérrez
Vicerrector de Asuntos Estudiantiles

Mayanín Rodríguez
Vicerrector de Asuntos Estudiantiles

Ricardo Him Chi
Vicerrector Administrativo

José Luis Solís
Director de Centros Regionales

Ricardo A. Parker D.
Secretaría General

José Álvaro
Presidente de la Asociación de Profesores

Consejo Editorial

Directora

Dra. Magaly de Chial

Universidad de Panamá, Facultad de Ciencias Naturales, Exactas y Tecnología, Panamá

mdechial@yahoo.com.mx <https://orcid.org/0000-0002-6393-9299>

Editor Jefe

Dr. Eduardo Camacho Astigarrabia

Universidad de Panamá, Facultad de Ciencias Naturales, Exactas y Tecnología, Panamá

eduardo.camachoa@up.ac.pa <https://orcid.org/0000-0001-7415-6786>

Consejo

Mgter. Roberto Cambra

Universidad de Panamá, Facultad de Ciencias Naturales, Exactas y Tecnología, Museo de Invertebrados,

Panamá roberto.cambra@up.ac.pa <https://orcid.org/0000-0002-3799-4710>

Dr. Enrique Medianero.

Universidad de Panamá, Facultad de Ciencias Naturales, Exactas y Tecnología, Panamá

enrique.medianero@up.ac.pa <https://orcid.org/0000-0002-8430-9034>

Dr. Armando Durant.

Universidad de Panamá, Facultad de Ciencias Naturales, Exactas y Tecnología, Panamá

armando.durant@up.ac.pa <https://orcid.org/0000-0002-6516-9427>

Mgter. Aurora Mejía

Universidad de Panamá, Facultad de Ciencias Naturales, Exactas y Tecnología, Escuela de Estadística, Panamá

aurora.mejia@up.ac.pa

Dr. Jancel Villalaz

Universidad de Panamá, Facultad de Ciencias Naturales, Exactas y Tecnología, Panamá

jancel.villalaz@up.ac.pa <https://orcid.org/0000-0001-8914-3216>

Mgter. Jacobo Araúz

Universidad de Panamá, Facultad de Ciencias Naturales, Exactas y Tecnología, Panamá jarauzg@hotmail.com

<https://orcid.org/0000-0003-4143-8300>

Dr. Jaime Gutiérrez

Universidad de Panamá, Facultad de Ciencias Naturales, Exactas y Tecnología, Panamá

jaime.gutierrez@up.ac.pa <https://orcid.org/0000-0002-5941-3892>

Dra. María de Stapp

Universidad de Panamá, Facultad de Ciencias Naturales, Exactas y Tecnología, Panamá <https://orcid.org/0000-0002-8095-5899>

Dr. Josep Batlló i Ortiz

Institut Cartogràfic i Geològic, Barcelona Catalunya, España

josep.batlo@icgc.cat <https://orcid.org/0000-0002-2493-3070>

Dr. Bruno Zachrisson

Instituto de Investigaciones Agropecuarias de Panamá (IDIAP). Panamá.

bruno.zachrissons@idiap.gob.pa <https://orcid.org/0000-0002-8219-7438>

Dr. Luis Wong Vega

Vicerrectoría de Investigación y Postgrado, Panamá luis.wongv@up.ac.pa / luis.wong.vega@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0003-0139-6134>

Dr. Fernando Gómez Merino

Colegio de Postgraduados, México

fernandg@colpos.mx

Dr. Edgardo Castro

Universidad de Panamá, Facultad de Ciencias Naturales, Exactas y Tecnología, Depto. de Genética y Biología

Molecular, Panamá edgardo.castro@up.ac.pa <https://orcid.org/0000-0003-4884-9479>

Dra. Yaxelis Mendoza

Universidad de Panamá, Facultad de Ciencias Naturales, Exactas y Tecnología, Depto. de Genética y Biología

Molecular yaxelis.mendoza@up.ac.pa <https://orcid.org/0000-0002-7113-0430>

Comité de diagramación, estilo y producción

Dr. Eduardo Camacho Astigarrabia

Universidad de Panamá - Editor Jefe

Michelle Ferrín

Universidad de Panamá - Secretaría Técnica

EDITORIAL

La Física: el motor invisible de la ciencia

Cuando un médico interpreta una radiografía, un químico sintetiza un nuevo compuesto, un ingeniero diseña un microchip o un biólogo analiza la dinámica celular, existe un denominador común que atraviesa silenciosamente todas estas prácticas: la física.

Con frecuencia, esta disciplina es percibida como un campo abstracto, asociado a formulaciones matemáticas complejas y representaciones simbólicas de alta densidad conceptual. No obstante, dicha percepción contrasta con su naturaleza profundamente integradora. La física constituye, en esencia, el lenguaje fundamental en el que se expresa la estructura del universo. Se caracteriza por abordar interrogantes tales como ¿qué es el movimiento?, ¿cómo se propaga la luz?, ¿qué se entiende por energía?, ¿de qué manera se manifiesta la dualidad onda-partícula en la mecánica cuántica?

Al responder estas interrogantes, la física no solo delimita su propio objeto de estudio, sino que provee principios explicativos y herramientas metodológicas esenciales para el resto de las ciencias experimentales. La química requiere de la física para comprender los mecanismos de enlace atómico y las interacciones moleculares; la biología la necesita para explicar procesos como la hemodinámica o la biomecánica estructural; y la tecnología médica de vanguardia, como los equipos de resonancia magnética funcional, no constituye sino una expresión aplicada de principios físicos al ámbito sanitario.

No obstante, quizás el aporte más significativo de la física al desarrollo científico general sea su contribución epistemológica y metodológica. Esta ciencia ha instituido un modo de proceder basado en la observación sistemática, la medición rigurosa y el escepticismo metódico, en el que ninguna afirmación se acepta sin la correspondiente validación experimental. Asimismo, ha proporcionado las bases tecnológicas para el desarrollo de instrumentación científica desde la microscopia avanzada hasta la observación astronómica de alta resolución.

Lejos de constituir una disciplina aislada en una torre de marfil, la física representa el cimiento implícito sobre el cual se erige el edificio del conocimiento científico contemporáneo. Reconocer su papel fundamental implica comprender que, en cada avance científico orientado a mejorar las condiciones de vida, la física ha estado presente como condición de posibilidad y como luz que guía el camino.



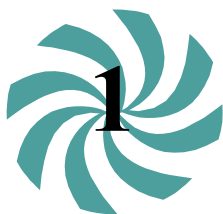
Dr. Eduardo Camacho Astigarrabía

ÍNDICE

TÍTULO	PÁGINAS
Ruta turística sostenible desde la perspectiva geológica al sur de la provincia de Los Santos, Panamá.....	8-32
Caracterización microclimática del Parque Omar, ciudad de Panamá, Panamá, mediante análisis comparativo de temperatura y humedad relativa.....	33-63
Efectos de la experiencia docente y otros contextos en matemáticas de estudiantes en octavo grado	64-90
Diversidad ecológica de los mamíferos de isla Coiba, Parque nacional Coiba, Panamá.....	91-108
Estandarización de un proceso artesanal para la elaboración de vino de nance (<i>byrsonima crassifolia</i>): aplicación a bebidas fermentadas artesanales.....	109-122
Mapeo de la red cósmica: comparación estadística de la estructura filamentaria en SDSS y distribuciones de galaxias simuladas.....	123-156
Comparación reproducible de modelos de lenguaje en problemas textuales de Mecánica Clásica mediante un benchmark automatizado.....	157-172
Caracterización estructural del manglar en el área occidental del Golfo de Montijo, Pacífico panameño.....	173-183
Síntesis en estado sólido de perovskita LaFeO ₃ asistida por precursor verde: papel del ácido tánico en las propiedades estructurales y magnéticas.....	184-209
Determinación de esfuerzos tectónicos Panamá a de terremotos en la microplaca de Panamá, República de Panamá.....	210-234
Briófitas corticícolas del Parque Nacional Camino de Cruces, Panamá.....	235-252
Razonamiento científico en estudiantes de primer ingreso: un estudio diagnóstico en la Universidad de Panamá.....	253-268

INDEX

QUALIFICATION	PAGES
Sustainable tourist route from a geological perspective to the south of the province of Los Santos, Panama.....	8-32
Microclimatic characterization of Omar Park, Panama city Panama, through comparative analysis of temperature and relative humidity.....	33-63
Effects of teaching experience and other contexts on mathematics of eighth-grade students.....	64-90
Ecological diversity of mammals of Coiba Island, Coiba National Park, Panama.....	91-108
Standardization of an artisanal process for the production of nance wine (<i>Byrsonima crassifolia</i>): application to artisanal fermented beverages.....	109-122
Mapping the Cosmic Web: A Statistical Comparison of Filamentary Structure in SDSS and Simulated Galaxy Distributions.....	123-156
Reproducible comparison of language models in textual problems of Classical Mechanics using an automated benchmark.....	157-172
Structural characterization of the mangrove in the western area of the Gulf of Montijo, Panamanian Pacific.....	173-183
Green precursor-assisted solid-state synthesis of LaFeO ₃ perovskite: role of tannic acid on structural and magnetic properties.....	184-209
Determination of tectonic stresses from the focal mechanisms of earthquakes in the Panama microplate, Republic of Panama.....	210-234
Corticulous bryophytes of the Camino de Cruces National Park Panama.....	235-252
Scientific Reasoning in First-Year Students: A Diagnostic Study at the University of Panama.....	253-268



Ruta turística sostenible desde la perspectiva geológica al sur de la provincia de Los Santos, Panamá

Sustainable tourist route from a geological perspective to the south of the province of Los Santos, Panama

Julissa Sanjur

Universidad de Panamá, Facultad de Ingeniería, Departamento de Ciencias de la Tierra, Panamá.

julissa.sanjur@up.ac.pa

<https://orcid.org/0009-0000-1845-9651>

Dalbis García

Universidad de Panamá, Centro Regional Universitario de Panamá Oeste, Panamá.

dalbis.garcia@up.ac.pa

<https://orcid.org/0000-0002-1329-3442>

Héctor Pineda

Universidad de Panamá, Instituto de Geociencias, Panamá.

hector.pineda-s@up.ac.pa

<https://orcid.org/0009-0009-1302-2843>

Damián Rodríguez

Universidad de Panamá, Facultad de Humanidades, Panamá.

damian.rodriguezc@up.ac.pa

<https://orcid.org/0009-0008-1527-510X>

Rosa Garces

Universidad de Panamá, Facultad de Humanidades, Panamá.

rosa-a.garces-p@up.ac.pa

<https://orcid.org/0009-0003-6927-5969>

Oris Rodríguez Reyes

Universidad de Panamá, Facultad de Ciencias Naturales, Exactas y Tecnología, Panamá.

oris.rodriguez@up.ac.pa

<https://orcid.org/0000-0002-2976-0017>

Autor de correspondencia: julissa.sanjur@up.ac.pa

Fecha de recepción: 25 de julio de 2025

Fecha de aceptación: 28 de febrero de 2026

DOI: <https://doi.org/10.48204/j.tecno.v8n2.a10326>



RESUMEN

Esta propuesta desarrolla una ruta geoturística sostenible en el sur de la provincia de Los Santos, en la República de Panamá, mediante una metodología aplicada y descriptiva, con fases replicables. Se identificaron geositos de interés geológico, paleontológico, paisajístico y comunitario usando GPS, SIG y criterios multicriterio (científico, educativo, estético, accesibilidad). Los resultados incluyen ríos, cascadas, pozos termales, montañas, sitios de flora y fauna, patrimonio arqueológico (cuevas, petroglifos, cantera), así como eventos culturales y deportivos. Se concluye que la integración del patrimonio natural, geológico y cultural fomenta un turismo sostenible, desarrollo económico, educación ambiental y conservación, ofreciendo un modelo replicable en Panamá y Centroamérica.

PALABRAS CLAVE

Geopatrimonio, geodiversidad, geoconservación, geoparques, geoturismo, geositos

ABSTRACT

This proposal develops a sustainable geotourism route in the southern part of Los Santos Province, Panama, using an applied and descriptive methodology with replicable phases. Geosites of geological, paleontological, scenic, and community interest were identified using GPS, GIS, and multi-criteria (scientific, educational, aesthetic, and accessibility). The results include rivers, waterfalls, hot springs, mountains, flora and fauna sites, archaeological heritage (caves, petroglyphs, and a quarry), as well as cultural and sporting events. The study concludes that integrating natural, geological, and cultural heritage fosters sustainable tourism, economic development, environmental education, and conservation, offering a replicable model for Panama and Central America.

KEYWORDS

Geoheritage, Geodiversity, Geoconservation, Geoparks, Geotourism, Geosites

INTRODUCCIÓN

Según Dowling y Newsome (2010) define que “El geoturismo es un tipo de turismo centrado en el patrimonio geológico y paisajístico, que promueve la conservación de los recursos geológicos y culturales, al mismo tiempo que fomenta la educación y el desarrollo sostenible de las comunidades locales”. Esta modalidad se inspira en la valorización, interpretación y conservación del patrimonio geológico, paisajístico y cultural de una región. Esta forma de turismo combina educación, recreación y conservación ambiental, fomentando la comprensión de los procesos que moldean los paisajes, formaciones rocosas, sistemas kársticos, fósiles y aguas termales. Además, vincula los elementos culturales y comunitarios, generando un impacto económico positivo y fortaleciendo la identidad local. Según Hose (1995) y Sandry (2009), el geoturismo promueve la protección de los recursos naturales y



En América Central, países como Guatemala, Costa Rica y Nicaragua se han desarrollado propuestas de geoturismo que integran rutas geológicas, turismo rural y preservación del ambiente. En Panamá, se ha tratado de hacer la búsqueda de los recursos potenciales en la Península de Azuero, especialmente al sur de Los Santos (Ver figura 1) para desarrollar rutas geoturísticas sostenibles, destacando recursos geológicos, paleontológicos y culturales. Se han identificado fósiles marinos, formaciones sedimentarias y volcánicas, así como sitios arqueológicos y tradiciones culturales que pueden incorporarse a itinerarios educativos y recreativos (Carrión-Mero et al., 2021; Pérez-Umaña & Quesada-Román, 2023).

Ruta turística para la zona de estudio, Provincia de Los santos, Panamá



A pesar del creciente interés en el geoturismo como base para el desarrollo sostenible y la conservación del patrimonio natural, para Panamá esta modalidad turística aún se encuentra en una etapa incipiente. Aunque se han identificado diversos recursos geológicos, arqueológicos y culturales en la Península de Azuero, especialmente en la provincia de Los Santos, no existe una ruta geoturística formalmente estructurada que integre estos elementos bajo criterios de valoración científica, educativa y recreativa. Esta falta de planificación

limita la posibilidad de aprovechar el potencial geoturístico de la zona y de consolidar iniciativas locales que promuevan la educación ambiental y la conservación del patrimonio.

La creación de una ruta geoturística sostenible en la provincia de Los Santos reviste gran importancia científica, educativa y socioeconómica. En primer lugar, permite revalorizar el patrimonio geológico, arqueológico y cultural de la región, promoviendo su conservación mediante actividades turísticas. Además, ofrece una alternativa de diversificación socioeconómica para las comunidades rurales, generando empleo y fortaleciendo la

identidad local a través del turismo educativo y ambientalmente consciente. Desde una perspectiva académica, este estudio aporta al avance del conocimiento sobre geoconservación y geoturismo en Panamá, al aplicar metodologías de inventario y evaluación multicriterio de geositos poco exploradas en el contexto nacional. Su relevancia radica en que los resultados pueden servir de base para políticas de gestión sostenible del territorio, el diseño de circuitos turísticos replicables y la integración del geoturismo en estrategias de desarrollo regional.

En este proyecto se integró análisis de campo, GPS, SIG, inventario de geositos y evaluación multicriterio de valor científico, educativo, estético, accesibilidad e infraestructura. Los resultados indicaron recursos naturales como ríos y cascadas (Río El Zumbón, Cascada Agua Buena, Cascada La Angostura, Charco El Salto del Río, Salto La Diabla), pozos termales (Aguas Calientes, Los Horcones, El Cortezo), montañas y cordilleras (Cerro Canajagua), y lugares de visualización de fauna y flora (Finca Agroturística Las Guaris, Mirador Alighiely). Asimismo, se encontraron sitios arqueológicos como las Cuevas de Morro de Puerco, la Cantera en La Tronosa y los petroglifos de La Cuchilla y Güera. En la ruta se anexaron también eventos culturales y deportivos, como la Feria de Tonosí, fiestas patronales (Virgen del Carmen, Virgen de la Candelaria, San Juan de Dios, San Antonio, San Roque, María Claret) y el Torneo de Pesca.

Los resultados demuestran que funcionar el patrimonio natural, geológico, arqueológico y cultural permite generar un turismo sostenible que fomenta el desarrollo económico, educación ambiental y conservación. El objetivo del proyecto fue diseñar una ruta geoturística sostenible que integre estos recursos y optimice la infraestructura y accesibilidad. La ruta propuesta constituye un modelo replicable en diferentes zonas con atractivo turístico de Panamá y Centroamérica, promoviendo la valorización responsable de los recursos y posicionando la región como un destino competitivo de geoturismo.



Marco Teórico

Turismo Sostenible: Nuevos productos

El turismo es parte clave para la economía global, generando empleo y riquezas. Según el Plan de Turismo Sostenible de Panamá (2020–2025), es crucial diversificar la oferta con productos innovadores que combinen desarrollo económico y conservación de recursos. Las rutas turísticas son una estrategia eficaz, que deben incluir servicios básicos como alojamiento, alimentación e infraestructura (Carcavilla et al., 2011). Además, se requiere planificación y herramientas legales para minimizar impactos negativos (Meléndez y Moreira, 2017).

Geología y paisaje: Aprovechamiento Sostenible de los recursos

La geología estudia los procesos que modelan el paisaje (Tarbuck et al., 2013). El patrimonio geológico puede transformarse en un potencial recurso turístico, generando beneficios económicos a través del geoturismo (Hose, 1995; Canet et al., 2017). Recursos como las aguas termales, por ejemplo, ya tienen aplicaciones turísticas, ofreciendo oportunidades de desarrollo local sostenible.

Geoturismo: Nueva alternativa de actividad turística

Hose (1995) definió el geoturismo como la promoción de sitios geológicos y geomorfológicos con valor educativo, asegurando su conservación. Este tipo de turismo se basa en el conocimiento y la interpretación de los recursos naturales, integrando aspectos culturales (Sandry, 2009). El geoturismo es una alternativa sostenible que impulsa el desarrollo rural y la conservación de recursos naturales, aportando valor científico.

Antecedentes

El geoturismo es reconocido en las últimas décadas como una estrategia integral para la valorización del patrimonio geológico y el desarrollo sostenible de las comunidades locales. Según Carrión-Mero et al. (2021), la planificación de rutas geoturísticas en América Latina debe fundamentarse en metodologías sistemáticas que integren inventarios de geositos, evaluación multicriterio y participación comunitaria, garantizando así la conservación del geopatrimonio y su aprovechamiento responsable. Estos autores destacan que la identificación rigurosa de sitios de interés geológico mediante trabajo de campo y herramientas SIG constituye la base para una gestión territorial sostenible.

Por su parte, Pérez-Umaña y Quesada-Román (2023) enfatizan la importancia de articular la geodiversidad con elementos culturales y paisajísticos para fortalecer el turismo rural y comunitario en Centroamérica. Su investigación demuestra que la integración del patrimonio natural y cultural no solo incrementa el atractivo turístico, sino que también promueve la educación geoambiental y la resiliencia económica de las comunidades. Asimismo, resaltan impulso de aplicar criterios de valoración científica, educativa y escénica en la selección de geositos.



Finalmente, Brilha (2016) establece un marco metodológico ampliamente utilizado para la evaluación y cuantificación del valor de los geositos, estableciendo parámetros relacionados con el valor científico, potencial educativo, atractivo turístico y vulnerabilidad. Este enfoque ha servido como referencia internacional para proyectos de geoconservación y desarrollo de geoparques, consolidando bases técnicas para la planificación de rutas geoturísticas sostenibles.

Todos estos aportes teóricos sustentan la aplicación de metodologías replicables para la identificación, valoración y puesta en valor del geopatrimonio, permitiendo diseñar rutas geoturísticas que integren conservación, educación y desarrollo socioeconómico.

MATERIALES Y METODOS

El diseño metodológico fue de carácter aplicado y descriptivo, con enfoque mixto (cuantitativo y cualitativo), enfocado a la caracterización geológica y turística del sur de la provincia de Los Santos, Panamá. La metodología se estructuró en fases secuenciales y replicables, siguiendo lineamientos aplicados en estudios recientes de geoturismo en América Latina y Centroamérica (Carrión-Mero et al., 2021; Pérez-Umaña & Quesada-Román, 2023; Quesada-Román et al., 2022).

Determinación del área de estudio

El sur de la provincia de Los Santos, en la Península de Azuero, se presenta como un área particularmente apropiada para el desarrollo de un estudio de ruta turística sostenible desde la perspectiva geológica por varias razones. Primero, estudios recientes han mostrado la riqueza geológica de la zona: por ejemplo, la cartografía geológica mediante tecnologías de teledetección ha permitido actualizar unidades litológicas y estructurales en Azuero, lo que demuestra que existen datos suficientes como base para identificar sitios de interés geológico (Pineda-Falcón et al., 2018). Además, en localidades como Tonosí se han encontrado fósiles marinos de tiburones y rayas en la Formación Tonosí, correspondientes al Eoceno, lo que añade valor científico paleontológico al territorio (Vásquez & Pimiento, 2014). Segundo, el turismo comunitario y rural en Panamá ha sido identificado como un motor de desarrollo local sostenible, capaz de articular comunidades, patrimonio natural y beneficios económicos sustantivos si se integran los recursos naturales y culturales de manera responsable (Domínguez et al., 2019). Por tanto, la combinación del patrimonio geológico evidente, los registros fósiles, la presencia de comunidades rurales con necesidades de diversificación económica y la viabilidad técnica mediante herramientas de SIG justifican plenamente escoger el sur de Los Santos como escenario para diseñar una ruta geoturística sostenible.



▪ **Climas y zonas de vida**

En el Oeste de Tonosí, el clima tropical húmedo predomina con temperaturas cálidas y lluvias abundantes todo el año. En el este, el clima tropical de sabanas tiene estaciones seca y lluviosa bien definidas. Ambos climas influyen en la vegetación, prevaleciendo el bosque húmedo tropical y premontano, según la clasificación de Holdridge (1967).

▪ **Hidrología del medio**

El río Tonosí es el más destacado del distrito, con una red hidrográfica que incluye las subcuencas de los ríos Güera y Guaniquito. Otros ríos importantes son el Guánico, Limón y Pedregal, naciendo en las elevaciones del distrito y formando cascadas (Hernández et al., 2019).

▪ **Topografía de la zona**

La topografía de Tonosí es accidentada, destacando las tierras altas como el macizo de Canajagua y el Parque Nacional Cerro Hoya. Las tierras bajas incluyen el valle de Tonosí y las llanuras costeras de Isla Cañas.

▪ **Geología regional**

La Península de Azuero tiene un basamento ígneo de basaltos del Cretácico Tardío y cinco unidades de roca identificadas. Las estructuras geológicas principales incluyen la falla Azuero-Soná y la falla Joaquín (Corral et al., 2016).

El Mapa geológico de la Península de Azuero destaca las Formaciones Tonosí, Santiago y Ocú, así como las zonas de fallas Joaquín, Azuero-Soná y Ocú Parita. Las rocas, que podrían tener más de 66 millones de años, incluyen esquistos verdes deformados en los ríos Torio y Quebro. Uno de los primeros estudios geológicos fue realizado por las Naciones Unidas para identificar yacimientos minerales, datando el complejo ígneo y nombrando formaciones como la Ocú (Del Giudice & Recchi, 1969).

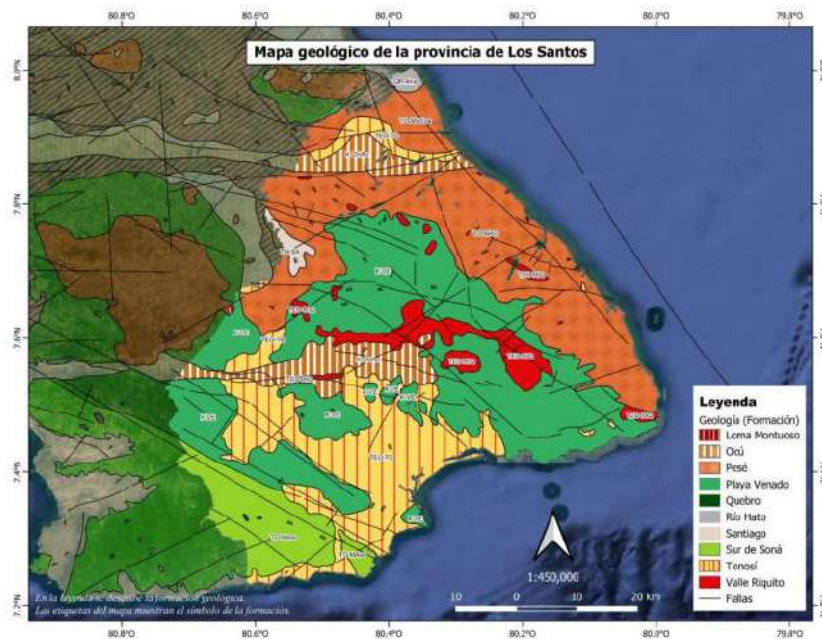
▪ **Geología local**

La provincia de Los Santos está compuesta por diez formaciones geológicas, incluyendo la Formación Pesé, Playa Venado, Tonosí, Ocú, Macaracas, Valle Riquito y Santiago como lo muestra la figura 2. Predominan formaciones sedimentarias y volcánicas, como tobas, lutitas, areniscas y basaltos. Además, hay afloramientos de rocas intrusivas. Las principales fallas en el sur de la provincia son la Ocú-Parita, Joaquín y Azuero-Soná (Buchs, 2011; MICI, 1991).



Figura 2

Formaciones Geológicas y fallas de la provincia de Los Santos de 1991. Tomado de del mapa geológico de Panamá en escala 1:250,000 (MICI, 1991).



Las montañas en la parte central de Los Santos, incluyendo el macizo de Canajagua, están compuestas por un complejo de rocas ígneas ácidas y básicas, con capas inclinadas del Eoceno. Esta región experimentó actividad volcánica y formación montañosa, que posiblemente culminó en el Plioceno o Pleistoceno. Es común encontrar contactos entre tobas y basaltos. La Formación Ocu incluye calizas hemipelágicas y pelágicas intercaladas con basaltos, reflejando la interacción entre sedimentación y erupciones volcánicas en un ambiente marino semiprofundo.

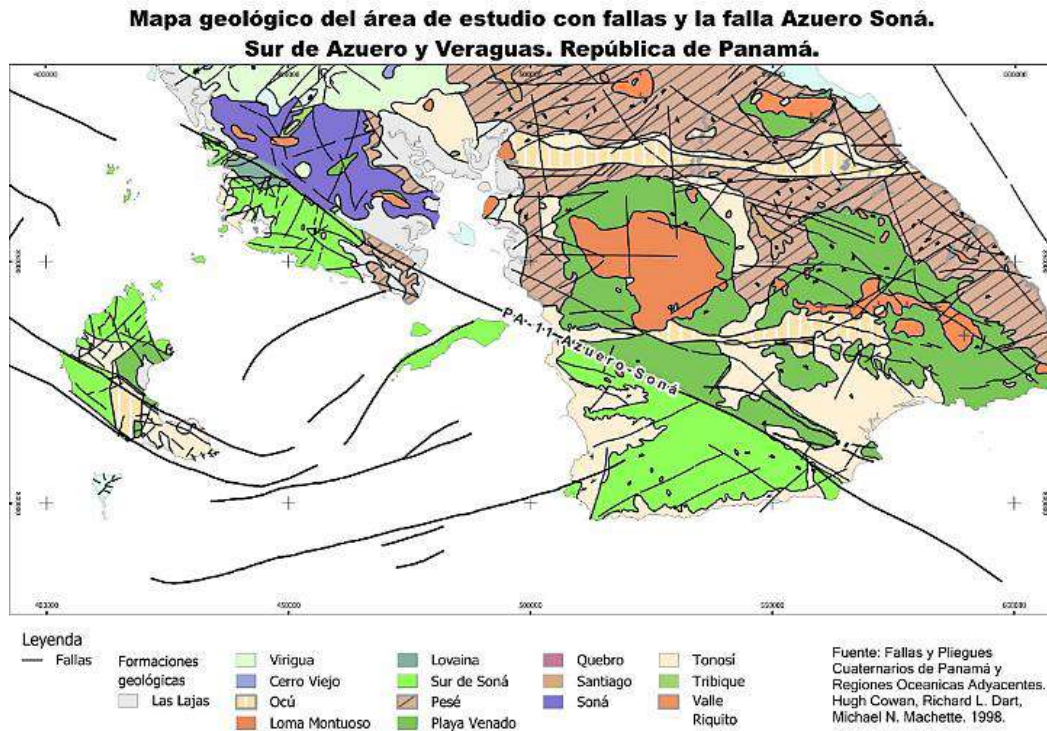
▪ Sismotectónica regional

El bloque de Panamá se divide en cinco zonas sismogénicas, siendo la península de Azuero una de ellas, ubicada en el sur del bloque. En esta región se presenta una subducción oblicua asísmica, con sismos profundos asociados principalmente a fallas de desplazamiento lateral izquierdo, como las fallas Tonosí y Azuero-Soná (Ver figura 3). Este sistema de fallas, conocido como Sistema de Fallas Azuero-Soná (SFAS), controla la tectónica activa de la región y ha sido responsable de varios sismos históricos severos, como los de 1516, 1803, 1913 y 1951. Además, se identifica una extensión del SFAS en el Océano Pacífico, llamada

Sistema de Fallas del Sur de Panamá, relacionada con movimientos entre la Placa de Nazca y el bloque de Panamá.

Figura 3

Mapa del Sistema de Fallas Azuero-Soná, 1998. Sistema de Fallas Azuero-Soná, se extiende



desde la Península de Azuero, provincia de Los Santos, hasta la Península de Soná, Provincia de Veraguas (Cowan et al., 1998).

▪ Paleontología

La península de Azuero posee una riqueza paleontológica significativa, con fósiles que ayudan a entender la evolución del istmo. En la Formación Tonosí, que data del Eoceno Superior, se han encontrado fósiles de tiburones y rayas, lo que la convierte en una de las formaciones sedimentarias más antiguas de Panamá (Ver figura 4). Además, estudios han revelado fósiles de plantas como frutas y polen, que sugieren un ambiente costero durante el Eoceno.

Figura 4

Fósiles de dientes de diferentes especies de tiburón encontrados en la Formación Tonosí en las localidades de Búcaro y Agua Buena, 2014. Fósiles de dientes de diferentes especies de tiburón joven y adulto (izquierda), Fósiles de placa dentaria de raya águila y partes vertebrales de tiburón (derecha) encontrados en la Formación Tonosí en las localidades de Búcaro y Agua Buena (modificado de Vásquez & Pimiento, 2014).



En la provincia de Los Santos, sitios como Los Olivos destacan por la abundancia de maderas fosilizadas, mientras que en Playa Búcaro se han encontrado semillas fósiles y maderas de diversas familias vegetales. También se han descubierto fósiles marinos, como estrellas de mar y bivalvos, en otras áreas como Bajo Guera, La Angostura y Macaracas.

Revisión bibliográfica y delimitación del área

Se organizaron fuentes académicas, informes técnicos y mapas geológicos del área de estudio (mapa geológico de Panamá, publicaciones de la Dirección de Recursos Minerales y del STRI). La revisión se centró en terminologías de geodiversidad, geoconservación y geoturismo, así como en inventarios previos en contextos similares de América Latina.

Identificación e inventario de geositos

Con base en las referencias bibliográficas y en giras de campo, se identificaron afloramientos geológicos, paisajes de interés, sistemas kársticos, zonas mineras y anomalías termales. Cada sitio se registró mediante GPS y SIG (QGIS/ArcGIS), incluyendo fotografías, notas de campo y coordenadas. Se aplicaron criterios de selección similares a los establecidos por Brilha (2016), tales como: Valor científico (geológico/geomorfológico), valor turístico y paisajístico, accesibilidad y servicios, estado de conservación.

Evaluación multicriterio de los geositos

Cada geosito fue analizado siguiendo una metodología semicuantitativa inspirada en modelos internacionales (Brilha, 2016) y adaptada a estudios regionales (Carrión-Mero et al., 2022; Pérez-Umaña & Quesada-Román, 2023). Los criterios de evaluación incluyeron: valor

científico, valor educativo, valor estético, accesibilidad, infraestructura y potencial para el turismo sostenible.

Análisis espacial mediante sistemas de información geográfica

Los datos obtenidos en campo se integraron en un sistema de información geográfica en este caso QGIS para generar mapas de distribución de geositios, infraestructura y vías de acceso. Se aplicó análisis de red para modelar posibles rutas turísticas, optimizando tiempos de recorrido, conectividad entre sitios y grado de atractivo.

Evaluación de servicios turísticos

Se inventariaron los servicios turísticos básicos para las actividades humanas (alojamiento, restaurantes, baños, señalización, guías, agua potable) en los sitios y localidades cercanas. Se aplicaron listas de control y evaluación; y entrevistas parcialmente estructuradas con actores locales.

Evaluación participativa y sostenibilidad

Se realizaron consultas y validaciones con comunidades locales, autoridades municipales y actores turísticos. A partir de estas sesiones, se efectuó un análisis SWOT (Fortalezas, Debilidades, Oportunidades y Amenazas) para validar los resultados y ajustar la ruta a criterios de sostenibilidad social, económica y ambiental.

Confección de la ruta

Como producto se elaboró la ruta geoturística sostenible con itinerarios propuestos, descripción de geositios y servicios asociados, mapas geoturísticos y recomendaciones de gestión y conservación.

RESULTADOS

Se realizó un inventario de sitios con interés geoturístico en el sur de la provincia de Los Santos, clasificados en diferentes categorías: sitios naturales; patrimonio urbano, arquitectónico y artístico; museos y manifestaciones culturales; etnografía y folklore; y acontecimientos. El recorrido se dividió en tres áreas principales: Cerro Canajagua, Tonosí y Cambutal.

- Cerro Canajagua: Incluye el Mirador Alighiely y la Finca Ecoturística Las Guaris.
- Tonosí: Comprende sitios como La Angostura, Aguas Calientes, El Zumbón Ranch, el Proyecto Minero Cerro Quema y los petroglifos de Güera.
- Cambutal: Abarca el pozo termal en Horcones, las Cuevas de Morro de Puerco, los petroglifos de La Cuchilla y el Mirador Natural de Cambutal.

Asimismo, se destacan atractivos culturales como las fiestas patronales y el torneo de pesca anual en Tonosí (ver la Tabla 1).



Tabla 1

Clasificación de los sitios con interés geológico y turístico al sur de Los Santos Panamá, 2023

Lugar	Categoría 1	Tipo	Subtipo
Río el Zumbón	Sitios Naturales	Ríos y caídas de agua	Salto
Cascada Agua Buena		Ríos y caídas de agua	Cascada
Cascada La angostura		Ríos y caídas de agua, formaciones paleontológicas, sistemas kársticos	Cascada
Charco el salto del río		Ríos y caídas de agua	Salto
Salto la Diabla		Ríos y caídas de agua	Salto
Pozo termal Aguas calientes		Aguas subterráneas	Aguas termales
Pozo termal Los Horcones		Aguas subterráneas	Aguas termales
Pozo termal El Cortezo			
Cerro Canajagua		Montañas y Cordilleras	Lomas o colinas
Finca Agroturística las Guarís		Lugar de observación de fauna y flora	Flora y fauna
Mirador Alighiely		Lugar de observación de fauna y flora	Flora y fauna
		Arqueología	
Cuevas de Morro de Puero		Formaciones geológicas o paleontológicas	Hidrogeológico
Cantera en la Tronosa		Formaciones geológicas o paleontológicas	Caliza
Lugar	Categoría 2	Tipo	Subtipo
Petroglifo en La Cuchilla y Güera	Patrimonio Urbano Arquitectónico y Artístico Museos y Manifestaciones culturales	Legado arqueológico	Sitios o conjuntos
Lugar	Categoría 3	Tipo	Subtipo
La Feria de Tonosí	Etnografía y Folklore	Folklore social	Feria
Evento	Categoría 4	Tipo	Subtipo
Fiestas patronales Virgen del Carmen	Acontecimientos programados	Artístico	Fiestas populares y religiosas
Fiestas patronales Virgen de la Candelaria			
Fiestas patronales San Juan de Dios			
Fiestas patronales San Antonio			
Fiestas patronales San Roque			
Fiestas patronales			



María Claret			
Torneo de pesca		Deportivo	Internacional

Nota. Adaptado de Metodología para la inventarización, jerarquización y categorización de los atractivos turísticos. Universidad Mayor de San Andrés. Elaboración propia

Esta tabla es una modificación de la investigación, jerarquización y categorización de los atractivos turísticos propuesta por Cahuaya Romero, S. (2010)

Sitios naturales

El Zumbón Ranch

Es un alojamiento turístico rural en Altos de Guëra, Tonosí, que ofrece cabañas y espacio para camping. El río Quema, pasa cerca del rancho a 103 metros sobre el nivel del mar. La zona presenta una charca de más de 3 metros de profundidad (Ver figura 5).

Figura 5

Salto de agua el Zumbón, río Quema, distrito de Tonosí, 2023



El sitio está compuesto por rocas ígneas basálticas de la formación Playa Venado, con textura afanítica y colores que varían de amarillo ocre a amarillo latón. Estas rocas son altamente resistentes y duraderas, con una meteorización entre II y III. La caída de agua tiene una inclinación de 60°, y los sedimentos transportados incluyen gravas y arenas medianas a gruesas.

La Angostura

La Angostura está en el curso medio del río Güëra, cerca de Loma Espino, en un cañón con paredes casi verticales como lo muestra la figura 6. Las rocas presentan estratificación horizontal y cavidades circulares formadas por erosión del agua. Se observan rocas calcáreas

con vetas mineralizadas, además de cuerpos calcáreos según Miranda (1976) se presentan como estratos de caliza sedimentaria, y un fósil coralino de hasta 30 cm en una de las paredes.

Figura 6

Vista de la Angostura, localizada en el curso medio del río Güera,



El Charco Salto del río

El Charco Salto del río se ubica al final del río La Pita, en el corregimiento de Nuario, distrito de Las Tablas. Las coordenadas son 7°28'5.19" de latitud Norte y 80°21'1.12" de longitud oeste, a 44 metros sobre el nivel del mar. Es una laguna de aproximadamente 300 m², con una profundidad de más de 2 metros cerca de la caída de agua (Ver figura 7).

Figura 7

El Charco Salto del Río, Nuario, Tonosí



El agua cae desde una altura de unos 4 metros, formada por rocas ígneas, con basaltos en la parte superior y aglomerados aluviales en la inferior. Durante la visita en temporada seca, se observó vegetación arbustiva seca alrededor.

Aguas Calientes

Ubicado en las riberas del río Guaniquito, Aguas Calientes presenta rocas sedimentarias, principalmente conglomerados y areniscas de color gris claro a oscuro como lo muestra la figura 8, con clastos de 3 a 14 cm en una matriz arenosa. Algunos conglomerados contienen carbonato de calcio, y los clastos son basaltos afaníticos con meteorización moderada a alta.

Figura 8

Conglomerados y areniscas del pozo termal aguas calientes



Mirador Alighiery

El este mirador se ubica en el Cerro Canajagua, en el cruce de Guararé, Las Tablas y Macaracas, a 832 metros sobre el nivel del mar. Desde el mirador, se observa una pendiente de 20° hacia el norte, con vegetación arbórea densa y lomeríos con surcos de erosión (Ver figura 9). El área está rodeada por un sistema de drenaje radial y un fallamiento geológico, lo que coincide con la descripción del mapa de relieve de Panamá (Atlas Ambiental de Panamá, 2020).

Figura 9

El mirador de Alighiely, ubicado en el Canajagua



Cuevas de Morro de Puerco

La playa de Morro de Puerco se localiza en las coordenadas 7°14'46.5" de latitud Norte y -80°28'0.2" de longitud Oeste, en las faldas del Cerro de la Cuchilla. Se observan numerosas rocas ígneas en forma de lajas, formadas por el rápido enfriamiento del magma, con una textura afanítica y muy duras como lo muestra la figura 10. Muy meteorizadas debido a la salinidad del agua de mar.

Las cuevas, erosionadas por las mareas como lo muestra la figura 11, tienen una entrada de 3 metros de altura. Durante la marea alta, el agua inunda la cueva, haciendo peligrosa su exploración.

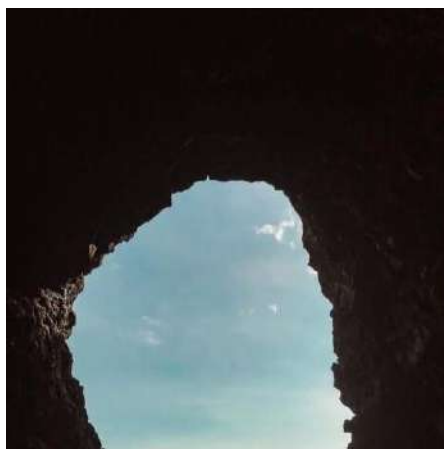
Figura 10

Cuevas de Morro de Puerco, distrito de Tonosí, 2023



Figura 11

Cuevas de Morro de Puerco, distrito de Tonosí, 2023



Patrimonio urbano arquitectónico y artístico museos y manifestaciones culturales

Petroglifos

Los petroglifos de Güera, ubicados en el corregimiento de Altos de Güera en el distrito de Tonosí, provincia de Los Santos, Panamá, son un testimonio significativo del arte rupestre precolombino en la región. Aunque la información específica de tipo de prácticas este sitio es limitada, se sabe que la zona alberga diversos petroglifos que reflejan las creencias y prácticas de las culturas indígenas que habitaron la península de Azuero.

La Figura 12 muestra diversos petroglifos ubicados en el distrito de Tonosí, provincia de Los Santos, Panamá, que reflejan la riqueza del patrimonio arqueológico de la región y su potencial turístico:

- Petroglifos en La Cuchilla, Cambutal (formas geométricas): Estas tallas en roca ígnea presentan formas geométricas que podrían haber tenido significados rituales, simbólicos o de orientación para las comunidades precolombinas que habitaron la península de Azuero. Las formas geométricas son comunes en el arte rupestre y suelen asociarse con la transmisión de conocimientos culturales o espirituales.
- Petroglifos en La Cuchilla, Cambutal (diseño de un hombre): Esta representación antropomorfa sugiere la importancia de la figura humana en las prácticas culturales de la época. Podría simbolizar líderes, ancestros o personajes mitológicos, reflejando la conexión de la comunidad con su entorno y su cosmovisión.
- Petroglifos en Güera (representación del sol): La talla del sol indica la relevancia de los astros y la naturaleza en la cosmovisión indígena. El sol, como fuente de vida y energía, probablemente tenía un significado religioso o calendario agrícola para las comunidades locales.
- Petroglifos en Altos de la Güera (figura de una serpiente): La serpiente es un símbolo recurrente en muchas culturas precolombinas, asociada con la fertilidad, el agua, la protección y la conexión espiritual. Su presencia en los petroglifos de Altos de la Güera refleja la importancia de estos conceptos en la cultura ancestral de la región.
- Petroglifos en Altos de la Güera (espiral): La espiral es un motivo común en el arte rupestre que puede simbolizar ciclos de la vida, evolución, continuidad y movimiento. Su inclusión en los petroglifos indica la sofisticación y profundidad del simbolismo utilizado por los habitantes originales del área.

En conjunto, estos petroglifos no solo son valiosos desde el punto de vista arqueológico, sino que también representan una oportunidad para el desarrollo del turismo cultural y educativo, permitiendo a visitantes y estudiosos conocer la historia y las creencias de las culturas precolombinas de Tonosí.



Figura 12

Petroglifos del distrito de Tonosí, provincia de Los Santos, Panamá. (a) Formas geométricas en roca ígnea, La Cuchilla, Cambutal; (b) Representación antropomorfa en La Cuchilla, Cambutal; (c) Representación del sol en Güera; (d) Figura de una serpiente en Altos de la Güera; (e) Espiral en Altos de la Güera. Ruta turística al sur de la provincia de los Santos, desde la perspectiva geológica

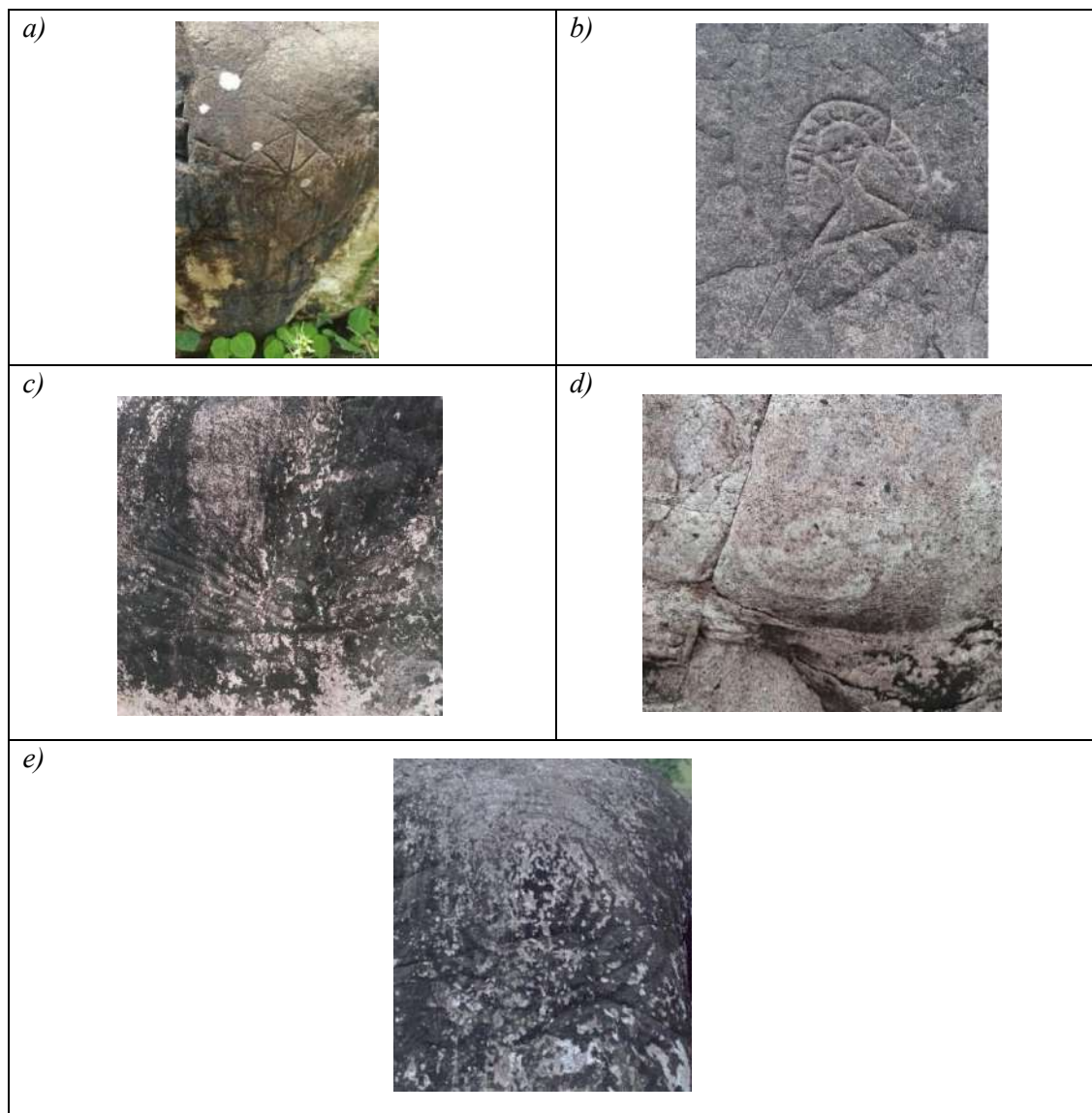


Ruta turística

Se identificaron catorce (14) puntos de interés turístico, los mismo se dividen en 2 categorías sitios naturales, patrimonio urbano arquitectónico y artístico museos y manifestaciones culturales combinados con 2 categorías más etnografía, folclore y acontecimientos. Como se muestra en la figura 13 iniciando en el distrito de guare y culminado en Cambutal, distrito de Tonosí, provincia Los Santos.

Figura 13

Petroglifos del distrito de Tonosí, provincia de Los Santos, Panamá. (a) Formas geométricas en roca ígnea, La Cuchilla, Cambutal; (b) Representación antropomorfa en La Cuchilla, Cambutal; (c) Representación del sol en Güera; (d) Figura de una serpiente en Altos de la Güera; (e) Espiral en Altos de la Güera. Estos sitios presentan un importante valor arqueológico y potencial turístico.



DISCUSIÓN

La riqueza natural, geológica y cultural del sur de Los Santos, con cascadas, pozos termales, formaciones geológicas y petroglifos, evidencia un alto potencial para el turismo sostenible. Vincular estos recursos con festividades y observación de flora y fauna ofrece experiencias educativas y culturales. La creación de rutas geoturísticas y geoparques puede promover la conservación del patrimonio y el desarrollo económico local. Sitios como el Valle de Antón, Cerro Gaital y Cerro Cabra reflejan oportunidades similares a estudiar como posibles geositios en Panamá. Así, la valorización de estos atractivos contribuye al turismo responsable y al posicionamiento del país como destino de geoturismo.

En el ámbito natural, destacan los ríos, y cascadas, como Río El Zumbón, Cascada Agua Buena, río La Angostura el fluyendo sobre un sistema kárstico, Charco El Salto del Río y Salto La Diabla, que representan no solo un atractivo escénico y recreativo, sino además una gran oportunidad de potencial educativo, al permitir la interpretación de procesos geológicos asociados a la erosión, sedimentación y dinámica fluvial. Los pozos termales (Aguas Calientes) y estructuras geomorfológicas como Cerro Canajagua ofrecen oportunidades complementarias para el ecoturismo y el turismo de bienestar, integrando la geología con experiencias recreativas y de salud. Asimismo, sitios como las cuevas de Morro de Puerco y la cantera en La Tronosa permiten la interpretación de formaciones geológicas y paleontológicas, fortaleciendo el componente científico y educativo de la ruta.

En cuanto al patrimonio cultural y arqueológico, los petroglifos de La Cuchilla y Güera representan un legado arqueológico significativo que puede ser parte en la ruta turística, permitiendo a los visitantes comprender la cosmovisión precolombina y la relación de las comunidades ancestrales con su entorno natural. La inclusión de lugares de observación de flora y fauna, como la Finca Agroturística Las Guarís y el Mirador Alighiely, permite combinar el componente cultural con el ecológico, fomentando una experiencia turística integral y sostenible.

El componente etnográfico y folklórico, representado por actividades de la Feria de Tonosí, y los eventos religiosos y festivos, como las fiestas patronales en honor a personajes católicos como la Virgen del Carmen, San Juan de Dios, San Antonio, San Roque y María Claret, así como el Torneo de Pesca Internacional, complementan la ruta turística al ofrecer experiencias vivenciales, promoviendo la identidad cultural local y generando oportunidades de desarrollo económico para las comunidades.

La integración de estos distintos atractivos demuestra que la región combina recursos geológicos, naturales, culturales y festivos, lo que permite diseñar una ruta turística sostenible que respete el medio ambiente, promueva la conservación del patrimonio y fortalezca la economía local. La planificación de esta ruta debe considerar la accesibilidad a



los sitios, la señalización interpretativa, la educación ambiental y la participación de las comunidades locales para garantizar que los beneficios sean sociales, culturales y económicos, además de preservar los recursos para futuras generaciones.

La provincia de Los Santos, en Panamá, comparte características geológicas y culturales con otros destinos tropicales reconocidos por su potencial geoturístico. Por ejemplo, el Geoparque Mundial de la UNESCO de Imbabura en Ecuador destaca por su patrimonio geológico y cultural, similar a Los Santos, que incluye formaciones volcánicas, cascadas y comunidades comprometidas con la geoconservación y el desarrollo sostenible del territorio (UNESCO, 2020). Asimismo, el Parque Nacional de Lorentz en Papúa Nueva Guinea, reconocido por su biodiversidad y complejidad geológica, ofrece un modelo de conservación integral que podría inspirar iniciativas iguales en la provincia de Los Santos (UNESCO, 2020). Estas comparaciones resaltan el potencial de Azuero para desarrollar el geoturismo, promoviendo la educación ambiental, la conservación del patrimonio y el desarrollo económico local a través de la valorización sostenible de sus recursos naturales y culturales.

CONCLUSIONES

Los atractivos turísticos del sur de la provincia de Los Santos evidencian una notable diversidad de recursos naturales, culturales y geológicos con alto potencial para el desarrollo del geoturismo sostenible. Las cascadas y ríos, como Río El Zumbón y el río La Angostura, junto con los pozos termales de Aguas Calientes y Los Horcones, ofrecen experiencias recreativas y educativas vinculadas a procesos geológicos y ecosistemas locales. Las formaciones geológicas y paleontológicas, como las cuevas de Morro de Puerco y la cantera en La Tronosa, brindan oportunidades para la interpretación científica y el turismo educativo. Por su parte, los petroglifos de La Cuchilla y Güera representan un valioso patrimonio arqueológico que puede integrarse con la observación de flora y fauna en sitios como la Finca Agroturística Las Guaris y el Mirador Alighiely. La incorporación de eventos culturales y festivos, como las ferias locales y las fiestas patronales, complementa la ruta turística, incentiva la identidad cultural y generando beneficios económicos para las comunidades. Comparando con otros destinos tropicales con geoturismo consolidado, como el Valle de Antón o Cerro Gaital, se evidencia que Azuero posee condiciones similares para desarrollar experiencias integrales de turismo sostenible. La planificación de rutas que integren recursos naturales, arqueológicos y culturales permitirá un turismo responsable, educativo y económicamente inclusivo. Además, la valorización de estos atractivos contribuye a la conservación del patrimonio natural y cultural, garantizando su preservación para futuras generaciones. En conclusión, los hallazgos del estudio demuestran que el sur de Los Santos posee un potencial significativo para el geoturismo sostenible, posicionando a la región como un destino competitivo en Panamá y en el contexto regional.



REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Atlas Ambiental de la República de Panamá. (2010). Autoridad Nacional del Ambiente (ANAM).
- Atlas Ambiental de la República de Panamá. (2020). Autoridad Nacional del Ambiente (ANAM).
- Atlas Nacional de la República de Panamá. (2019). Instituto Geográfico Nacional Tommy Guardia (quinta edición, revisada, actualizada y aumentada). Autoridad Nacional de Administración de Tierras.
- Autoridad de Turismo de Panamá. (2020). *Plan de Turismo Sostenible de Panamá 2020–2025*. Autoridad de Turismo de Panamá.
- Brilha, J. (2016). Inventory and quantitative assessment of geosites and geodiversity sites: A review. *Geoheritage*, 8(2), 119–134. <https://doi.org/10.1007/s12371-014-0139-3>
- Buchs, D. M., Baumgartner, P. O., Baumgartner-Mora, C., Flores, K., & Bandini, A. N. (2011). Upper Cretaceous to Miocene tectonostratigraphy of the Azuero area (Panama) and the discontinuous accretion and subduction erosion along the Middle American margin.
- Cahuaya Romero, S. (2010). Metodología para la inventarización, jerarquización y categorización de los atractivos turísticos. Universidad Mayor de San Andrés. https://repositorioslatinoamericanos.uchile.cl/handle/2250/1175217?show=full&utm_source=chatgpt.com
- Tectonophysics*, 512(1-4), 31–46. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2011.09.010>
- Carcavilla, L., Belmonte, A., Durán, J. J., & Hilario, A. (2011). Geoturismo: Concepto y perspectivas en España. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 19(1), 81.
- Canet, C., Mora-Chaparro, J. C., Iglesias, A., Cruz-Pérez, M. A., Salgado-Martínez, E., Zamudio-Ángeles, D., ... & Poch, J. (2017). Cartografía geológica para la gestión del geopatrimonio y la planeación de rutas geoturísticas: Aplicación en el Geoparque Mundial de la UNESCO Comarca Minera, Hidalgo. *Terra Digitalis*, 1(2), 1–7.
- Carrión-Mero, P., Borja-Bernal, C., Herrera-Franco, G., Morante-Carballo, F., Jaya-Montalvo, M., Maldonado-Zamora, A., Paz-Salas, N., & Berrezueta, E. (2021).



Geosites and geotourism in the local development of communities of the Andes Mountains: A case study. *Sustainability*, 13(9), 4624. <https://doi.org/10.3390/su13094624>

Carrión-Mero, P., Pérez, R., & González, J. (2021). Potencial geoturístico en la Península de Azuero, Panamá: Recursos geológicos, paleontológicos y culturales. *Revista Panameña de Geografía y Turismo*, 5(2), 45–62.

Carrión-Mero, P., Turner-Carrión, M., Herrera-Franco, G., Bravo-Murillo, G., Aguilar-Aguilar, M., Paz-Salas, N., & Berrezueta, E. (2022). Geotouristic route proposal for touristic development in a mining area—Case study. *Resources*, 11(3), 25. <https://doi.org/10.3390/resources11030025>

Corral, I., Cardellach, E., Corbella, M., Canals, À., Gómez-Gras, D., Griera, A., & Cosca, M. A. (2016). Cerro Quema (Azuero Peninsula, Panama): Geology, alteration, mineralization, and geochronology of a volcanic dome-hosted high sulfidation Au–Cu deposit. *Economic Geology*, 111(2), 287–310. <https://doi.org/10.2113/econgeo.111.2.287>

Cowan, H., Machette, M. N., Haller, K. M., & Dart, R. L. (1998). Map and database of Quaternary faults and folds in Panamá and its offshore regions. U.S. Geological Survey Open-File Report 98–779. <https://pubs.usgs.gov/of/1998/ofr-98-0779/>

Del Giudice, D., & Recchi, G. (1969). *Geología del área del Proyecto Minero de Azuero, República de Panamá*. Administración de Recursos Minerales, Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo.

Domínguez, M. del R., & Butrón, L. del C. (2019). El turismo comunitario como factor de desarrollo local sostenible en espacios rurales. *Centros: Revista Científica Universitaria*, 8(1), 167–173. Universidad de Panamá. <https://revistas.up.ac.pa/index.php/centros/article/view/487>

Dowling, R., & Newsome, D. (2010). *Geotourism: The tourism of geology and landscape*. Goodfellow Publishers.

ETESA. (1999). *Mapa hidrogeológico de Panamá* (escala 1:1,000,000). República de Panamá.

Hernández Frías, G. J., & Salazar Pinilla, L. C. (2019). Influencia de la dureza del agua en ríos y pozos en la efectividad de plaguicidas, provincia de Los Santos, Panamá. *Revista Investigaciones Agropecuarias, Universidad de Panamá*.



- Holdridge, L. R. (1967). *Life zone ecology*. Tropical Science Center.
- Hose, T. A. (1995). Selling the story of Britain's stone. *Environmental Interpretation*, 10(2), 16–17.
- Hose, T. A. (1995). Selling the story of the rocks: Geological interpretation in the development of geotourism. *Geological Society, London, Special Publications*, 96(1), 43–54. <https://doi.org/10.1144/GSL.SP.1995.096.01.05>
- Hose, T. A. (2016). Three centuries (1670–1970) of appreciating physical landscapes. *Geological Society, London, Special Publications*, 417(1), 1–23. <https://doi.org/10.1144/SP417.15>
- Meléndez-Hevia, G., Moreira, J. C., & Carcavilla-Urqui, L. (2017). Geoturismo: El paso de un recurso a un atractivo. *Terr@ Plural*, 11(2), 327–337.
- MICI. (1991). *Mapa geológico de Panamá en escala 1:250,000*. Dirección Nacional de Recursos Minerales, Ministerio de Comercio e Industrias.
- Miranda Gómez, R. (1976). Geología del área de Loma Espino, Distrito de Tonosí, Provincia de Los Santos, Panamá [Tesis de licenciatura]. Universidad de Costa Rica.
- Pérez-Umaña, D., & Quesada-Román, A. (2023). Methodology for evaluating and assessing geomorphosites in Costa Rica: Poás Volcano as study area. *Revista Geográfica de América Central*, 60(1), 1–26. <https://doi.org/10.15359/rgac.60-1.4>
- Pineda-Falcónett, M., Batista San Juan, X., Fernández Villarán, R., & Nieto, J. M. (2018). Teledetección en la cartografía geológica de la Península de Azuero (Panamá). *Centros: Revista Científica Universitaria*, 7(1), 121–130. up-rid.up.ac.pa
- Quesada-Román, A., Torres-Bernhard, L., Ruiz-Álvarez, M. A., Rodríguez-Maradiaga, M., Velázquez-Espinoza, G., Espinosa-Vega, C., Toral, J., & Rodríguez-Bolaños, H. (2022). Geodiversity, geoconservation, and geotourism in Central America. *Land*, 11(1), 48. <https://doi.org/10.3390/land11010048>
- Sandry, J. (2009). Geotourism and sustainable development: Linking conservation with visitor experience. *Tourism Geographies*, 11(3), 352–367. <https://doi.org/10.1080/14616680903050677>



UNESCO. (2020). Parque nacional de Lorentz. <https://whc.unesco.org/es/list/955>

Vásquez, S., & Pimiento, C. (2014). Tiburones y rayas de la Formación Tonosí (Eoceno de Panamá). *Revista Geológica de América Central*, 51(1), 165–169. <https://doi.org/10.15517/rgac.v51i1.16911>





Caracterización microclimática del Parque Omar, ciudad de Panamá, Panamá, mediante análisis comparativo de temperatura y humedad relativa

Microclimatic characterization of Omar Park, Panama city Panama, through comparative analysis of temperature and relative humidity

David Quintero Ramirez

Universidad de Panamá, Facultad de Ingeniería, Departamento de Ciencias de la Tierra, Panamá.

david-a.quintero-r@up.ac.pa

<https://orcid.org/0009-0009-6324-8066>

Mayubell Alvarado-Valdes

Universidad de Panamá, Facultad de Ciencias Naturales, Exactas y Tecnología, Departamento de Física, Panamá.

mayubell.alvarado-v@up.ac.pa

<https://orcid.org/0009-0007-7017-956X>

Bairon Perez Ruiz

Universidad de Panamá, Facultad de Ingeniería, Departamento de Ciencias de la Tierra, Panamá.

bairon-e.perez-r@up.ac.pa

<https://orcid.org/0009-0005-3602-8632>

José Luis Alvarez

Universidad de Panamá, Facultad de Ingeniería, Departamento de Ciencias de la Tierra, Panamá.

jose.alvarez03@up.ac.pa

<https://orcid.org/0009-0001-7208-8780>

David Camaño Morales

Universidad de Panamá, Facultad de Ingeniería, Departamento de Ciencias de la Tierra, Panamá.

david-a.camano-m@up.ac.pa

<https://orcid.org/0009-0005-0043-8197>

Dionisio Escobar Moreno

Universidad de Panamá, Facultad de Ingeniería, Departamento de Ciencias de la Tierra, Panamá.

dionisio-j.escobar-m@up.ac.pa

<https://orcid.org/0009-0001-9878-2826>

Yamir Del Cid

Universidad de Panamá, Facultad de Ingeniería, Departamento de Ciencias de la Tierra, Panamá.

yamir.delcid@up.ac.pa

<https://orcid.org/0009-0006-8616-3952>

Fecha de recepción: 8 de octubre de 2025

Fecha de aceptación: 26 de enero de 2026

DOI: <https://doi.org/10.48204/j.tecno.v8n2.a10837>



RESUMEN

El acelerado proceso de urbanización en la Ciudad de Panamá ha generado transformaciones significativas en el paisaje natural, intensificando los efectos de las islas de calor urbanas y alterando la calidad ambiental. En este contexto, los parques urbanos, como el Parque Recreativo y Cultural Omar, cumplen un rol esencial al moderar las temperaturas mediante la sombra y la evapotranspiración, ofreciendo espacios más confortables y sostenibles.

El estudio se desarrolló durante la estación lluviosa de 2025, con observaciones realizadas en horarios diurnos (mañana, mediodía y tarde), capturando la variabilidad térmica bajo condiciones contrastantes de nubosidad y precipitación. Los resultados revelan contrastes térmicos de hasta 3 °C dentro del parque, directamente relacionados con el tipo de cobertura vegetal y uso del suelo. Las zonas con alta densidad arbórea exhibieron condiciones más estables y frescas (28,7 °C –29,30 °C), mientras que áreas asfaltadas y espacios recreativos expuestos registraron temperaturas extremas (>30,50 °C), superando los umbrales de confort térmico establecidos por la norma ASHRAE 55-2017.

Estos hallazgos subrayan la importancia de integrar datos microclimáticos localizados en la planificación urbana, con el fin de diseñar estrategias de mitigación que reduzcan el estrés térmico y mejoren la experiencia de los usuarios en espacios públicos tropicales.

PALABRAS CLAVE

Confort térmico, isla de calor urbana, parques urbanos, calidad ambiental, estrés térmico.

ABSTRACT

The accelerated urbanization process in Panama City has led to significant transformations in the natural landscape, intensifying the effects of urban heat islands and altering environmental quality. In this context, urban parks—such as the Omar Recreational and Cultural Park—play a key role in moderating temperature through shade and evapotranspiration, providing more comfortable and sustainable environments.

The study was conducted during the 2025 rainy season, with observations taken at daytime intervals (morning, noon, and afternoon) to capture thermal variability under contrasting conditions of cloudiness and precipitation. The results reveal thermal contrasts of up to 3 °C within the park, directly related to vegetation cover and land use. Areas with high tree density exhibited more stable and cooler conditions (28,70 °C –29,30 °C), whereas asphalted zones and exposed recreational spaces recorded extreme temperatures (>30,50 °C), exceeding the thermal comfort thresholds established by ASHRAE Standard 55-2017.

These findings highlight the importance of integrating localized microclimatic data into urban planning to design mitigation strategies that reduce thermal stress and enhance user experience in tropical public spaces.

KEYWORDS

Thermal comfort, urban heat island, urban parks, environmental quality, heat stress.



INTRODUCCIÓN

En un contexto de urbanización acelerada y transformación del paisaje natural, comprender las dinámicas microclimáticas urbanas resulta crucial. Las condiciones locales de temperatura y humedad impactan directamente la calidad de vida, el confort térmico, la salud pública y la sostenibilidad ambiental (Flores et al., 2018).

En este sentido, el estudio de los microclimas en áreas verdes adquiere especial relevancia por su capacidad para regular la temperatura (Perén et al., 2022). En entornos densamente construidos, los parques y bosques urbanos mitigan el efecto de isla de calor y reducen el consumo energético asociado a sistemas de climatización (García, 2017).

Frente a los desafíos del cambio climático, especialmente en regiones tropicales como la Ciudad de Panamá, es fundamental recopilar datos microclimáticos espacialmente localizados para caracterizar con precisión las condiciones térmicas de los espacios públicos. Por ello, los bosques urbanos y áreas verdes se consolidan como infraestructuras ecológicas clave, al contribuir a la reducción de la contaminación, la conservación de la biodiversidad, la captura de CO₂ y la mejora del confort térmico (Martini, Biondi, & Batista, 2017).

En este marco, la evaluación microclimática del Parque Omar, un pulmón verde clave en el centro de la Ciudad de Panamá adquiere gran importancia (Dirección de Planificación Urbana, 2025). Este estudio busca generar datos espacialmente distribuidos que permitan identificar zonas de estrés térmico, evaluar el comportamiento del parque y proponer estrategias de mitigación sustentadas en evidencia empírica.

Antecedentes

Los bosques urbanos son esenciales para regular el microclima mediante la sombra y la evapotranspiración, mejorando el confort térmico. Un estudio en la Ciudad de Panamá (2016–2024) utilizó imágenes satelitales y ArcGIS para mostrar cómo la fragmentación de áreas forestales intensifica la isla de calor, evidenciando la necesidad de estrategias de mitigación frente al cambio climático (Fiol et al., 2024).

Espacios verdes, como parques, actúan como islas de frío, reduciendo la temperatura del aire hasta 4 °C en comparación con áreas urbanizadas. Investigaciones en Panamá (Santa Ana), México (Chapultepec), y otras ciudades latinoamericanas destacan que la densidad, tipo y distribución de vegetación son clave para optimizar el comportamiento térmico, lo que refuerza su rol en la planificación urbana (García, 2017).

La evaluación microclimática del Parque Omar enfrenta brechas significativas. Aunque estudios locales han analizado el impacto de la vegetación, carecen de datos espaciales detallados, índices estandarizados como el PET (*Physiological Equivalent Temperature*) o el



UTCI (*Universal Thermal Climate Index*), y comparaciones entre dispositivos portátiles (ej. *Fluke 971*) y estaciones meteorológicas. Un estudio integral que combine teledetección, censos de vegetación y mediciones in situ permitirá optimizar su función como mitigador del calor urbano y mejorar la planificación de espacios públicos en Panamá (Ortega, 2018; He et al., 2022).

Microclima Urbano

Las ciudades modernas, como centros de urbanización, presentan condiciones climáticas particulares determinadas por las características del territorio, el urbanismo y las actividades humanas (Cárdenas, 2012).

El entorno urbano concentra variables climáticas y ecológicas, como la radiación solar, el viento, la temperatura, la humedad y la precipitación, que generan modificaciones locales conocidas como *microclima urbano*. Estas alteraciones, inducidas por la acción humana, influyen directamente en la dinámica climática de las ciudades (Khan et al., 2021).

La morfología urbana, incluyendo la orientación de las calles, la altura y densidad de los edificios, los materiales de baja reflectancia térmica y la escasa cobertura vegetal, incide de forma significativa en el balance energético local, modificando la absorción y disipación del calor en el entorno urbano. Estas características favorecen el fenómeno de la isla de calor urbana, haciendo que las ciudades sean más cálidas que sus áreas periféricas (Andreou, 2013; Emilsson, 2021).

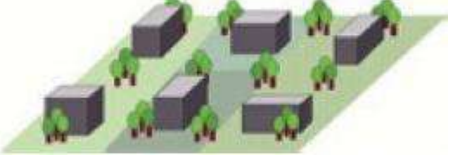
En consecuencia, la urbanización transforma el uso del suelo y reduce la vegetación, alterando el equilibrio térmico. Factores como la temperatura, el viento, la humedad y la radiación solar, junto con el diseño del tejido urbano, determinan las condiciones microclimáticas en ciudades de distintos tamaños (Ng et al., 2012).

El análisis de la forma urbana y su impacto en el microclima permite identificar elementos clave para diseñar entornos exteriores más confortables. Mediante una planificación urbana sostenible, es posible mitigar los impactos térmicos negativos y promover el desarrollo de ciudades resilientes y ambientalmente confortables (Therán Nieto et al., 2019).



Tabla 1

Descripción de las geometrías urbanas del corregimiento de San Francisco (Adaptada de Stewart & Oke, 2012)

Tipo de Edificio	Definición
Alta densidad con edificios altos 	Mezcla densa de edificios altos de hasta decenas de pisos. Pocos o ningún árbol. La cobertura del suelo es mayormente pavimentada. Materiales de construcción: concreto, acero, piedra y vidrio.
Alta densidad con edificios medianos 	Mezcla densa de edificios de mediana altura (3 a 9 pisos). Pocos o ningún árbol. La cobertura del suelo es mayormente pavimentada. Materiales de construcción: piedra, ladrillo, teja y concreto.
Alta densidad con edificios bajos 	Mezcla densa de edificios bajos (1 a 3 pisos). Pocos o ningún árbol. La cobertura del suelo es mayormente pavimentada. Materiales de construcción: piedra, ladrillo, teja y concreto.
Baja densidad con edificios altos 	Disposición abierta de edificios altos de hasta decenas de pisos. Abundancia de cobertura del suelo permeable (plantas bajas, árboles dispersos). Materiales de construcción: concreto, acero, piedra y vidrio.
Baja densidad con edificios medianos 	Disposición abierta de edificios de mediana altura (3 a 9 pisos). Abundancia de cobertura del suelo permeable (plantas bajas, árboles dispersos). Materiales de construcción: concreto, acero, piedra y vidrio.
Baja densidad con edificios bajos 	Disposición abierta de edificios bajos (1 a 3 pisos). Abundancia de cobertura del suelo permeable (plantas bajas, árboles dispersos). Materiales de construcción: madera, ladrillo, piedra, teja y concreto.

Efectos de las islas de calor

Las islas de calor urbanas (ICU) resultan de la acumulación de calor antropogénico asociada a la morfología urbana y a los materiales de baja reflectancia térmica, lo que incrementa el consumo energético, deteriora la calidad del aire y compromete el confort térmico y la salud de la población (Candanedo & Villarreal, 2020).

El calor antropogénico, producido por la demanda energética y las emisiones del transporte motorizado de combustibles fósiles, contribuye a la liberación de gases de efecto invernadero que intensifican la isla de calor urbana (ICU) y deterioran la calidad del aire (Candanedo & Villarreal, 2020; Shashua-Bar et al., 2010).

Los materiales de construcción con bajo albedo, como los de tonos oscuros, absorben más calor, mientras que la vegetación, al disiparlo mediante fotosíntesis, mitiga el problema; su reducción agrava las ICU (Therán Nieto et al., 2019).

La geometría urbana, definida por la disposición de calles y edificios, altera la radiación solar, la ventilación y los flujos térmicos, modificando el microclima urbano (Candanedo & Villarreal, 2020).

Confort Térmico

El confort térmico, definido por la norma ISO 7730 como la satisfacción con el ambiente térmico, es crucial en espacios exteriores, donde las percepciones individuales influyen en la experiencia de actividades al aire libre (Organización Internacional de Normalización, 2005; Liu et al., 2023).

La norma ISO 7730 incorpora el método Fanger, que evalúa el confort térmico mediante variables como temperatura, humedad, velocidad del aire, nivel de actividad y características de la ropa, las cuales determinan los intercambios térmicos entre el cuerpo y el entorno (Fanger, 1972).

Un ambiente térmicamente confortable mejora la concentración, la productividad y el aprendizaje, beneficiando el desempeño físico y mental (Jiang et al., 2021). En parques recreativos, fomenta la permanencia, las actividades físicas y sociales, y reduce el estrés térmico, especialmente en climas cálidos, incrementando la percepción positiva del espacio (Lin, 2009; Nikolopoulou & Steemers, 2003).

El diseño de estos espacios, con sombra, vegetación y ventilación natural, aumenta la seguridad y satisfacción de los usuarios, fortaleciendo el valor recreativo y social del



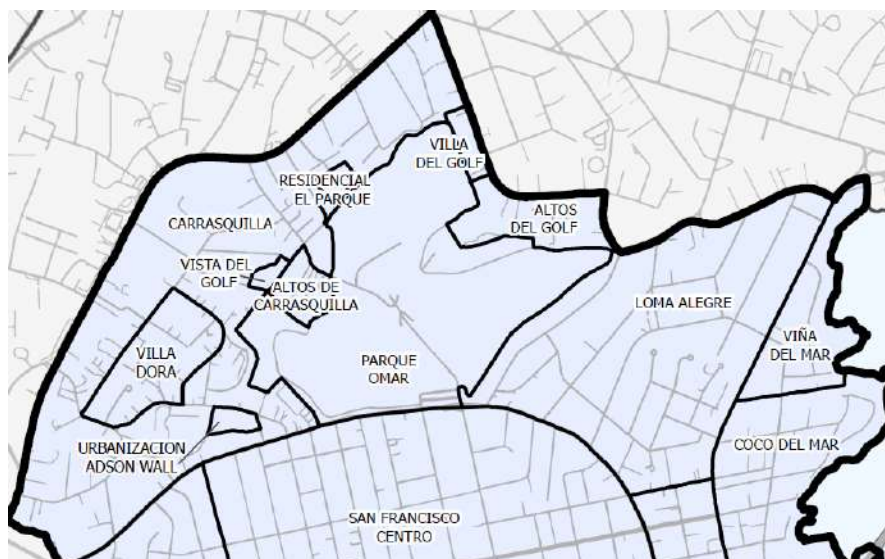
parque (Lin, 2009). Los estudios de confort térmico son esenciales para crear entornos sostenibles que optimicen la eficiencia energética y protejan la salud frente al cambio climático (Aghamolaei & Lak, 2023).

Sin embargo, las temperaturas elevadas representan un riesgo grave. Por cada aumento de 1 °C por encima de la temperatura de referencia, la morbilidad por enfermedades relacionadas con el calor y la mortalidad aumentan en un 18 % y un 35 %, respectivamente, afectando especialmente a adultos mayores y regiones subtropicales (Zhang et al., 2022). Por ejemplo, en España, superar los 16 °C eleva en un 74 % el riesgo de fallecimiento por golpe de calor (Achebak et al., 2023), mientras que en Portugal las olas de calor incrementan un 53 % las hospitalizaciones por enfermedades infecciosas, y en Brasil el 7,4 % de los ingresos por problemas renales se atribuyen al calor (Silva et al., 2024). Estas condiciones también agravan las enfermedades cardiovasculares, comprometiendo la salud pública, especialmente en poblaciones vulnerables (Zhang et al., 2022).

ÁREA DE ESTUDIO

Figura 1

Límites del Parque Recreativo Omar según la Dirección de Planificación Urbana (2025). Al norte: Altos del Golf, Villa del Golf y Residencial el Parque. Al este: Loma Alegre y Viña del Mar. Al sur: San Francisco Centro. Al oeste: Carrasquilla, Vista del Golf, Villa Dora y Urbanización Adson Wall (Adaptado de Dirección de Planificación Urbana, 2025).



El Parque Recreativo y Cultural Omar es de acceso gratuito, opera de 5:00 a.m. a 10:00 p.m. y recibe unos 5,000 visitantes diarios, 150,000 mensuales y hasta 1.8 millones anuales



(Ministerio de la Presidencia, 2022). Ofrece una pista principal de 3,5 km para caminar, trotar o patinar, senderos internos de 5 km, parques infantiles, campos deportivos (fútbol, béisbol, tenis, baloncesto), un anfiteatro, una Casa Club y máquinas de ejercicio al aire libre. Alberga la Biblioteca Nacional Ernesto J. Castillero, la Escuelita de Fútbol de la Fundación de Amigos del Real Madrid Panamá y actividades como yoga, zumba y boxeo, promoviendo el bienestar físico y social (Ministerio de la Presidencia, 2022).

Su biodiversidad floral, según un inventario de 2019, incluye 2,773 individuos de 126 especies (2,496 árboles, 25 arbustos, 252 palmeras) (Ministerio de Ambiente de Panamá, 2019). La vegetación del Parque Recreativo y Cultural Omar forma un ecosistema resiliente compuesto por árboles de gran porte, arbustos y hierbas. La canopia de árboles maduros regula la temperatura y ofrece hábitat a aves y otros animales. Arbustos, helechos y enredaderas prosperan en áreas sombreadas, mientras que hierbas resistentes ocupan espacios abiertos cerca de pistas y campos deportivos. Esta estructura modula la luz solar, la temperatura y la humedad, creando un microclima favorable para diversas especies de aves, insectos y otros organismos, al tiempo que mejora el confort térmico y la experiencia de los visitantes (Ministerio de Ambiente de Panamá, 2019).

MATERIALES Y MÉTODOS

Descripción Técnica de la Instrumentación

El instrumento empleado fue el termohigrómetro portátil Fluke 971, diseñado para la medición de temperatura del aire y humedad relativa en estudios de calidad ambiental. Incorpora un sensor de temperatura tipo NTC y un sensor de humedad de capacitancia electrónica, lo que asegura confiabilidad en condiciones de campo.

Su rango de operación es de -20°C a 60°C para temperatura, con exactitud de $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ en el intervalo de $0,0-45,0^{\circ}\text{C}$, y de 5 % a 95 % HR para humedad relativa, con exactitud de $\pm 2,5$ % en el rango de 10–90 % HR a 23°C . La resolución es de $0,1^{\circ}\text{C} / 0,1\%$ HR, con un tiempo de respuesta de 60 s y capacidad de almacenamiento de 99 registros (Fluke Corporation, 2005).

Técnicas de Recolección de Datos

El procedimiento metodológico se estructuró en dos fases principales: planificación y delimitación, y recolección de datos. En la etapa de planificación, las zonas de estudio fueron identificadas y clasificadas según la densidad de vegetación y el tipo de uso del suelo (áreas arboladas, pavimentadas o abiertas), con el fin de seleccionar puntos de medición estratégicos en cada sección del parque.

Durante la fase de recolección se realizaron mediciones directas de temperatura del aire ($^{\circ}\text{C}$) y humedad relativa (%) con el termohigrómetro portátil Fluke 971, bajo un protocolo diseñado para garantizar la confiabilidad y comparabilidad de los registros.



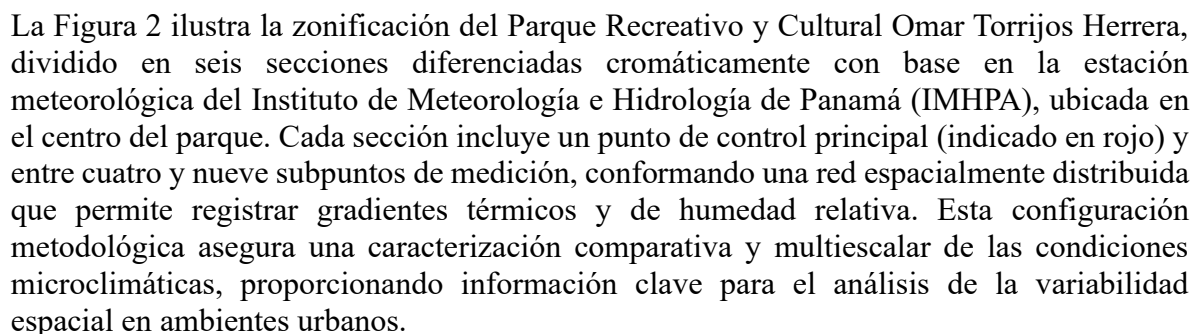
Las mediciones se efectuaron a dos alturas de referencia, 1,00 m y 1,75 m sobre el nivel del suelo, representando la zona respiratoria promedio de un niño y de un adulto, respectivamente. Con el propósito de evitar la influencia directa de la radiación solar sobre los sensores, las lecturas se efectuaron en áreas sombreadas o mediante el empleo de una pantalla de protección, lo que permitió asegurar la estabilidad térmica del instrumento.

En cada punto de muestreo, el equipo fue dejado en estabilización durante un minuto previo al registro de los valores, con el fin de garantizar su adaptación a las condiciones microclimáticas locales. Posteriormente, se documentaron la temperatura, la humedad relativa y las condiciones atmosféricas particulares de la jornada en un total de 45 puntos georreferenciados distribuidos dentro del Parque Recreativo y Cultural Omar Torrijos Herrera.

Las mediciones se efectuaron durante el periodo comprendido entre junio y agosto de 2025, coincidiendo con la estación lluviosa. El muestreo se desarrolló durante jornadas diurnas, distribuidas en tres franjas horarias correspondientes a la mañana, el mediodía y la tarde, con el propósito de registrar la evolución térmica e higrométrica a lo largo del día. Se incluyeron tanto días sin precipitación como jornadas lluviosas, a fin de representar la variabilidad meteorológica característica del periodo de estudio. Este procedimiento permitió caracterizar la variabilidad térmica e higrométrica bajo condiciones contrastantes y garantizar una cobertura espacial representativa de la totalidad del parque.



Zonificación del Parque Recreativo y Cultural Omar Torrijos Herrera en seis secciones con puntos de medición distribuidos.



La Figura 3 presenta la caracterización espacial del Parque Recreativo y Cultural Omar Torrijos Herrera en función de la cobertura superficial y la morfología del terreno. En el mapa, las zonas de verde intenso corresponden a áreas con alta densidad arbórea, el verde claro identifica espacios abiertos con escasa cobertura vegetal, el marrón señala senderos peatonales, mientras que los tonos grises distinguen superficies pavimentadas (gris oscuro) y áreas bajo techo (gris claro). Esta clasificación tipológica permite evaluar la influencia diferencial de cada tipo de cobertura en la modulación del microclima urbano, aportando evidencia para el análisis de procesos vinculados con la disipación del calor, la regulación de la radiación solar y los patrones de confort térmico en entornos urbanos.

Figura 3

Caracterización de coberturas distribución de áreas arboladas, abiertas, senderos, superficies pavimentadas y zonas bajo techo.



Análisis y Visualización de Datos

El análisis se orientó a caracterizar el microclima del Parque Omar a partir de los registros de temperatura y humedad relativa obtenidos con el dispositivo portátil Fluke 971. Los datos fueron recolectados en diferentes zonas del parque, a dos alturas (1,00 m y 1,75 m), y consolidados en promedios diarios y semanales para cada punto de muestreo.

Los valores registrados se procesaron aplicando técnicas estadísticas descriptivas, incluyendo medidas de tendencia central (media y mediana) y de dispersión (varianza y desviación estándar), con el fin de sintetizar la información y facilitar la comparación entre áreas. Para explorar las relaciones entre temperatura y humedad relativa se utilizó el modelo de regresión lineal simple y coeficiente de determinación, que mide qué proporción de la variabilidad de la temperatura se explica por la humedad relativa en este modelo lineal.

La representación espacial se realizó mediante la elaboración de mapas de calor e isotermas en QGIS, que permitieron visualizar los contrastes microclimáticos, identificar anomalías locales y evaluar la influencia del uso del suelo en el confort térmico. Estos resultados se

complementaron con gráficos bivariados, que facilitaron el análisis temporal de la interacción entre temperatura y humedad relativa en distintos intervalos horarios.

Para la elaboración de los mapas de temperatura e isotermas se empleó una base de datos compuesta por 45 puntos de medición, que incluían las coordenadas geográficas y los valores promedio de temperatura registrados en campo. Esta información fue importada al software QGIS 3.34, donde se generó una capa vectorial georreferenciada conforme al sistema de coordenadas oficial (WGS 84).

Posteriormente, se incorporó el polígono delimitador del Parque Recreativo y Cultural Omar como área de análisis, y se aplicó el método de interpolación espacial IDW (Inverse Distance Weighting) o Ponderación Inversa de la Distancia, con el propósito de obtener una superficie térmica continua que representara la distribución espacial de la temperatura en el parque. El ráster resultante fue recortado al perímetro del parque y clasificado en 21 intervalos de color definidos según rangos térmicos homogéneos. Finalmente, la cartografía temática se complementó con los elementos convencionales de representación: escala gráfica, barra de colores, orientación norte y título, asegurando su correcta interpretación visual y comparabilidad espacial.

Este enfoque analítico permitió no solo identificar las zonas críticas de estrés térmico y las áreas con mejores condiciones de confort, sino también evaluar la aplicabilidad del Fluke 971 como herramienta de medición microclimática urbana, generando resultados comparables con estándares de confort térmico.

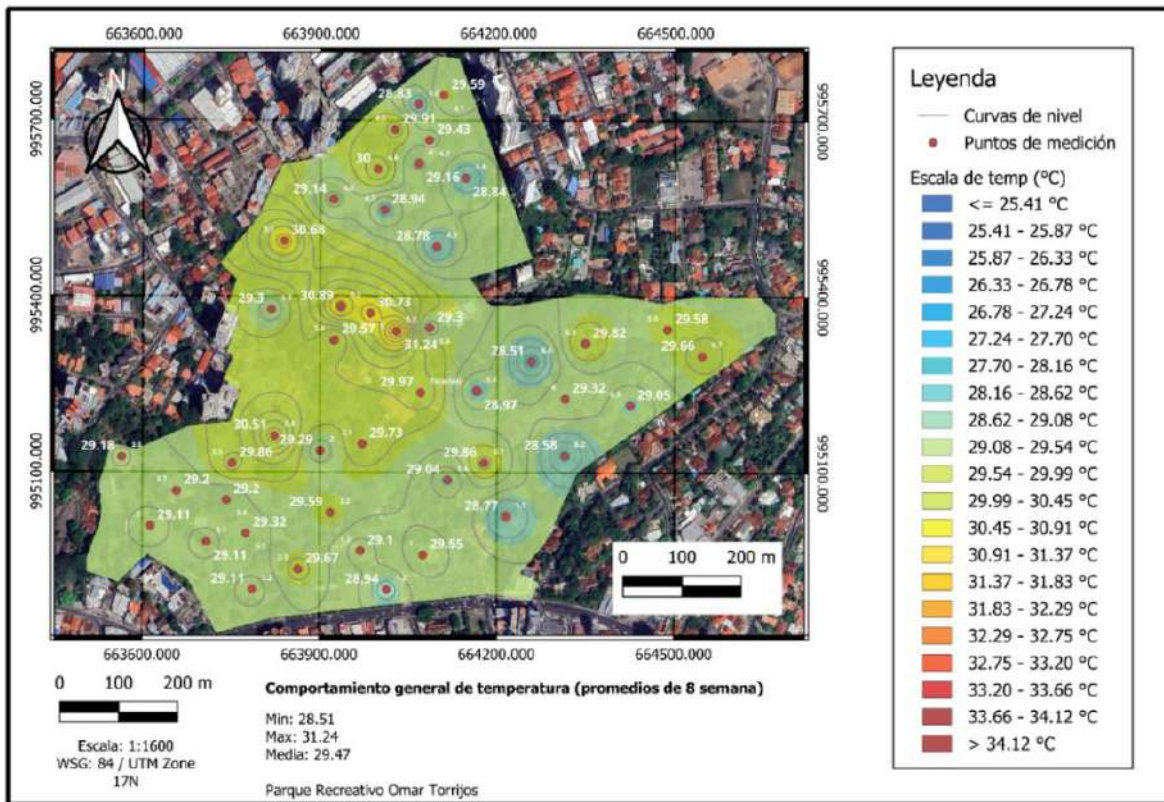
RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La distribución espacial de la temperatura en el Parque Recreativo y Cultural Omar mostró una marcada dependencia del tipo de cobertura vegetal y del uso del suelo. Durante las ocho semanas de observación, las temperaturas promedio registradas fluctuaron entre 28,51 °C y 31,24 °C, con un valor medio de 29,47 °C. La diferencia térmica interna de casi 3 °C evidencia la heterogeneidad microclimática del parque, aspecto que adquiere especial importancia en regiones tropicales húmedas como la Ciudad de Panamá, donde pequeñas variaciones térmicas inciden significativamente en el confort térmico y en la percepción ambiental de los usuarios.



Figura 4

Mapa de isotermas promedio y distribución espacial de temperaturas promedio en estación lluviosa.



En la zona 1.0, con fuentes decorativas, pérgolas y asientos al aire libre, la temperatura media varía entre 29,1 °C y 29,3 °C. El agua y las estructuras de sombra mitigan la radiación solar, proporcionando un bienestar térmico adecuado para estancias breves. Sin embargo, la humedad puede intensificar la sensación de calor, por lo que se recomienda aumentar la ventilación natural en horas de mayor bochorno.

Por su parte, la zona 1.2, que alberga el domo para actividades masivas y ejercicio, registra temperaturas más altas, entre 28,9 °C y 31,2 °C. El calor acumulado en este espacio cubierto, combinado con la alta densidad de personas, genera condiciones desfavorables, con riesgo de estrés térmico durante eventos concurridos.

La zona 1.3, destinada a restaurantes y canchas sintéticas, presenta temperaturas intermedias de 29,5 a 30,2 °C. Los espacios gastronómicos, bien ventilados, ofrecen un ambiente tolerable, pero las superficies sintéticas absorben calor, aumentando la incomodidad en horas de máxima radiación. Incorporar cubiertas ligeras o vegetación en las canchas podría mejorar las condiciones.

En las áreas de juegos infantiles, el comportamiento térmico varía según la cobertura. La zona 2.0, al aire libre, alcanza los 29,3 °C, resultando cálida y poco confortable, especialmente para niños. En contraste, la zona 2.1, con estacionamientos asfaltados y canchas de tenis, supera los 30,5 °C debido al efecto de isla de calor urbana generado por el pavimento, siendo una de las áreas menos favorables. Por otro lado, la zona 2.2, que combina juegos infantiles, bancos, restaurantes y un pequeño anfiteatro, registra temperaturas de 29,3 a 29,8 °C. La presencia de vegetación modera el calor en áreas sombreadas, aunque las zonas expuestas requieren mayor arbolado. Se recomienda instalar toldos retráctiles para mejorar el confort en esta última.

En el sector tres, la zona 3.2, con senderos arbolados, se destaca como una de las más frescas, con temperaturas entre 28,7 °C y 29,1 °C. La sombra y la evapotranspiración de la vegetación crean un microclima agradable, ideal para caminatas. En la zona 3.5, con gacebos y juegos mecánicos infantiles, las temperaturas oscilan entre 29,0 °C y 29,3 °C. Los gacebos proporcionan alivio térmico, haciendo este espacio apto para el descanso. Sin embargo, la zona 3.7, con canchas de voleibol y baloncesto, alcanza entre 29,1 °C y 30,8 °C debido a las superficies duras y la exposición solar. La actividad física intensifica la sensación de calor, por lo que se aconseja incorporar arbolado perimetral o techos ligeros.

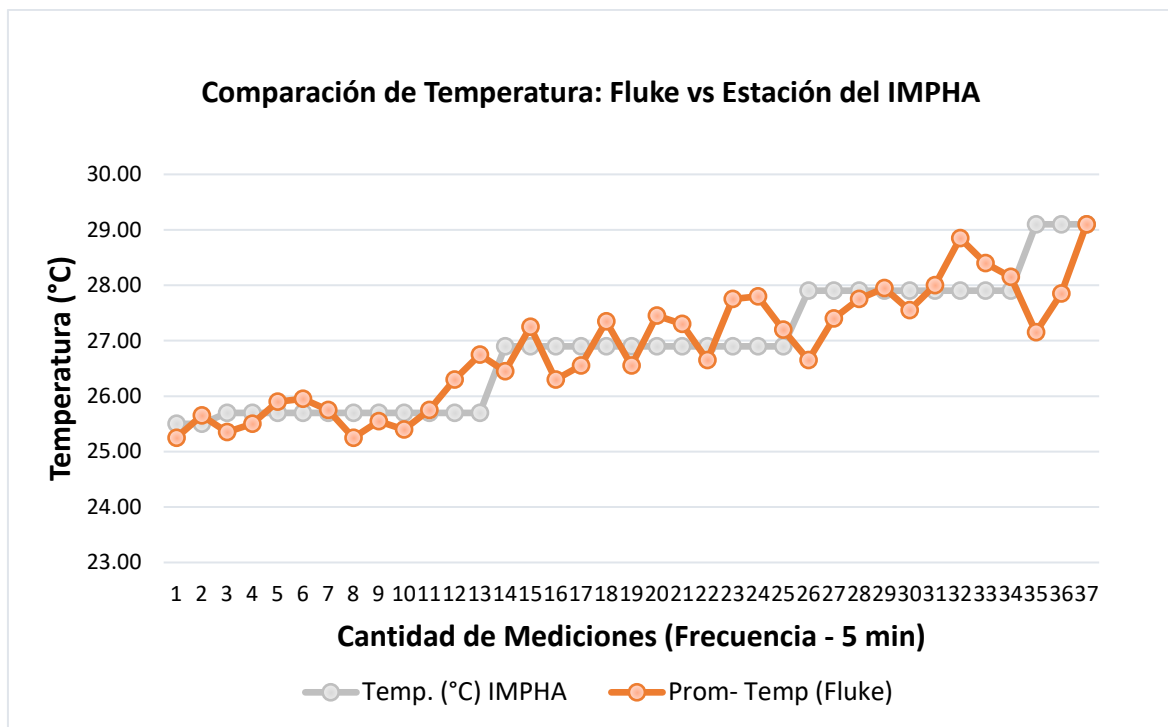
En el área destinada al parque de perros (zonas 4.0, 4.2 y 4.5), las temperaturas varían de 29,3 °C a 29,7 °C. Las áreas sombreadas ofrecen un confort moderado, pero los sectores abiertos resultan menos favorables para usuarios y mascotas. Aumentar la cobertura vegetal sería una solución efectiva.

Por su parte, el sector cinco presenta condiciones contrastantes. El anfiteatro al aire libre (5.0) supera los 30,5 °C, con alta exposición solar que reduce el confort durante eventos diurnos. El estacionamiento asfaltado (5.2) y la parte trasera de la biblioteca (5.5), ambos con temperaturas cercanas a 31,0 °C, sufren un fuerte efecto de isla de calor. Se recomienda sustituir parte del pavimento por materiales permeables o incrementar la vegetación. En cambio, la piscina al aire libre (5.6) mantiene temperaturas de 29,0 °C a 29,3 °C, reguladas por el agua y el arbolado cercano, creando un microclima fresco y agradable.

Finalmente, en el sector seis, la pista de ciclismo (6.0) registra temperaturas de 29,5 °C a 30,2 °C. La actividad física y el calor pueden disminuir el confort, por lo que se sugiere usarla en horarios de menor radiación. Las zonas 6.4, 6.5 y 6.8, con predominio de cobertura arbórea, son las más favorables del parque, con temperaturas entre 28,7 °C y 29,1 °C. La sombra y la humedad retenida por la vegetación generan condiciones frescas y estables, ideales para actividades recreativas.

Figura 5

Evaluación de la correspondencia térmica entre el sensor Fluke 971 y la estación meteorológica del IMHPA



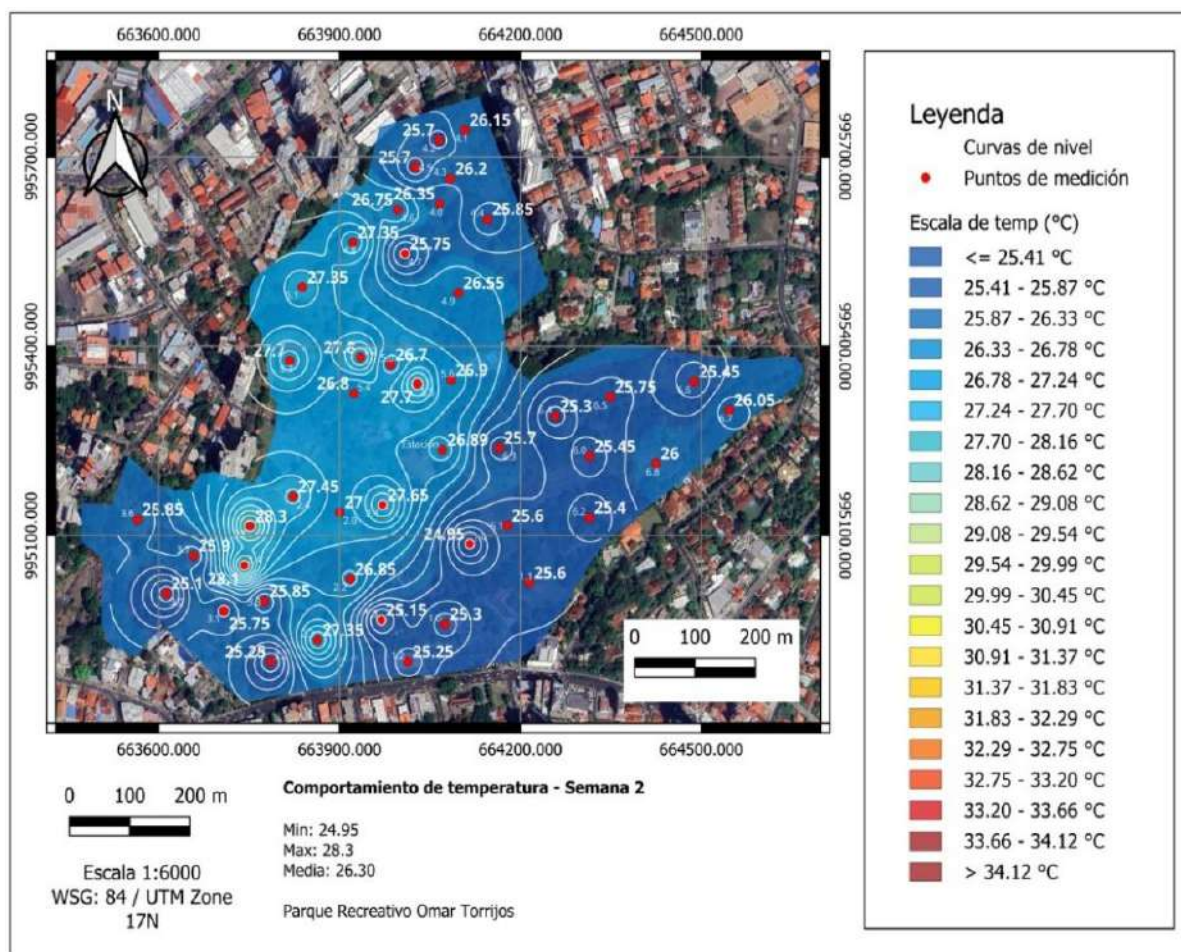
El análisis comparativo evidencia una alta concordancia entre las mediciones del sensor Fluke y la estación del IMHPA, lo que respalda la validez y confiabilidad del instrumento portátil utilizado en campo. En general, ambas series muestran una tendencia ascendente progresiva de la temperatura a lo largo del periodo de observación, reflejando el incremento térmico diurno asociado a la radiación solar y la disminución de la humedad relativa hacia las horas centrales del día.

Durante las primeras mediciones, entre los puntos 1 y 10, se observa una estabilidad térmica en torno a los 25–26 °C, atribuible a las condiciones matutinas y a la presencia de nubosidad parcial. A partir de la medición 13, las temperaturas aumentan de manera sostenida, alcanzando valores próximos a 29 °C hacia el final de la serie (medición 37), lo cual sugiere un máximo térmico diurno típico de ambientes tropicales húmedos.

Las diferencias puntuales entre ambos registros, menores a 0.5 °C, pueden explicarse por factores microclimáticos locales como la exposición solar directa, la circulación del aire y la altura del sensor respecto al suelo.

Figura 6

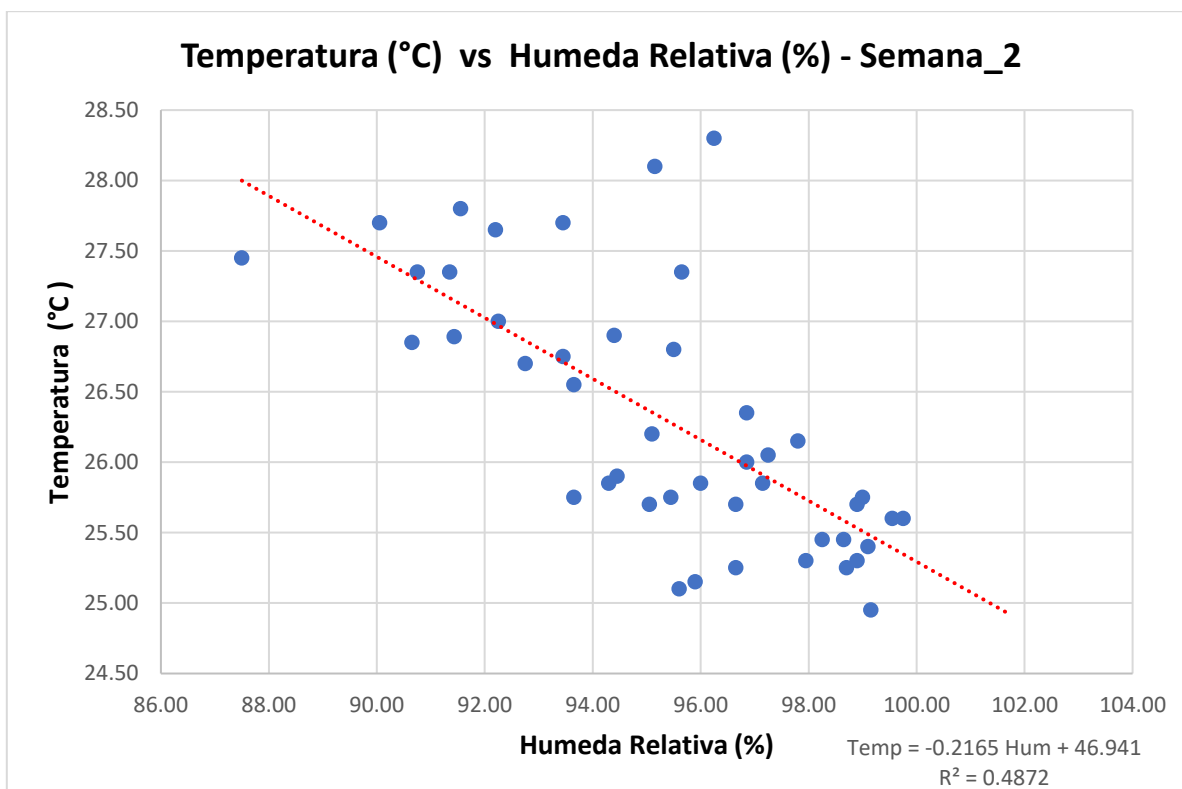
Mapa de isotermas y distribución espacial de temperaturas en un día de lluvias intensas.



Predomina una saturación de humedad relativa (>98 %), probablemente asociada a lluvias recientes o a una elevada nubosidad (Fig. 7). En este contexto, las temperaturas se mantienen frescas y estables; sin embargo, las áreas 5 y 2 presentan valores ligeramente más altos debido a la menor cobertura de sombra y a la presencia de infraestructuras como la Casa Club, canchas de tenis, piscina al aire libre, anfiteatro y zona de juegos infantiles, además de superficies asfaltadas que favorecen la acumulación de calor (Fig. 6). Este comportamiento coincide con estudios que destacan el papel de la vegetación en la retención de humedad y la moderación térmica en entornos urbanos (Bowler et al., 2010; Emmanuel & Krüger, 2012; Santamouris, 2015).

Figura 7

Relación entre temperatura y humedad relativa en un día de lluvia intensa.



El mapa de isotermas correspondiente a un día de lluvias ligeras muestra un gradiente térmico atenuado, con transiciones suaves entre clases de temperatura debido a la menor radiación solar directa y al enfriamiento evaporativo de las superficies húmedas (Fig. 8). Este efecto genera una distribución espacial más homogénea en amplios sectores del parque. Aun así, las áreas 5 y 2 mantienen valores ligeramente más altos de temperatura. La inercia térmica de estos materiales y su bajo albedo explican la persistencia de estos núcleos cálidos.

Se registra un incremento térmico significativo ($>30\text{ }^{\circ}\text{C}$) con descenso progresivo de la humedad relativa (Fig.9), fortaleciendo la correlación negativa ($R^2 > 0.9$). Las zonas expuestas al sol y con menor vegetación presentan temperaturas extremas, mientras que áreas densas en vegetación mantienen condiciones más estables.

Figura 8

Mapa de isotermas y distribución espacial de temperaturas en un día de lluvias ligera.

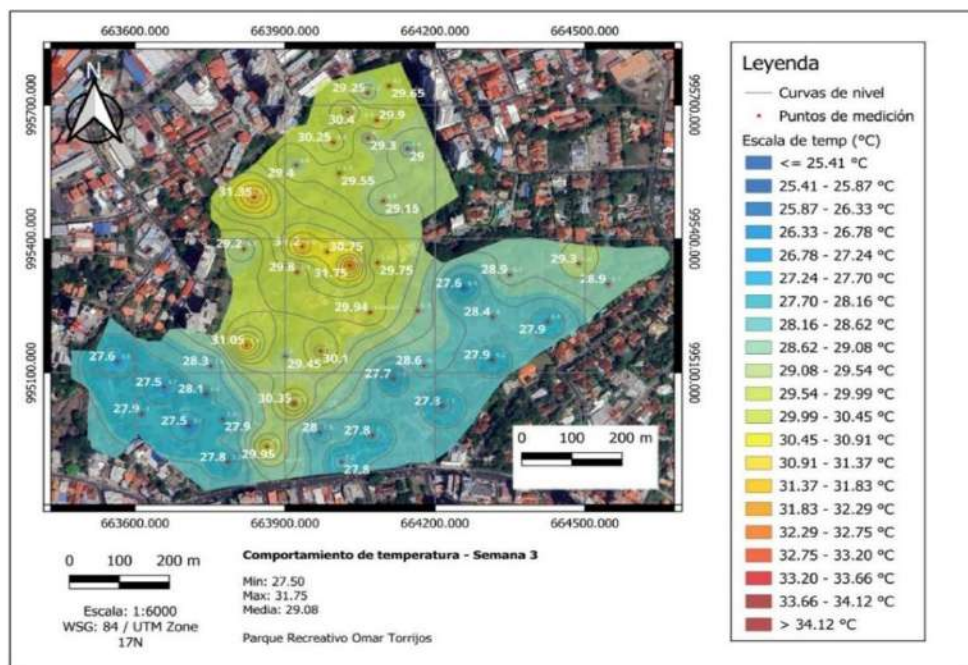
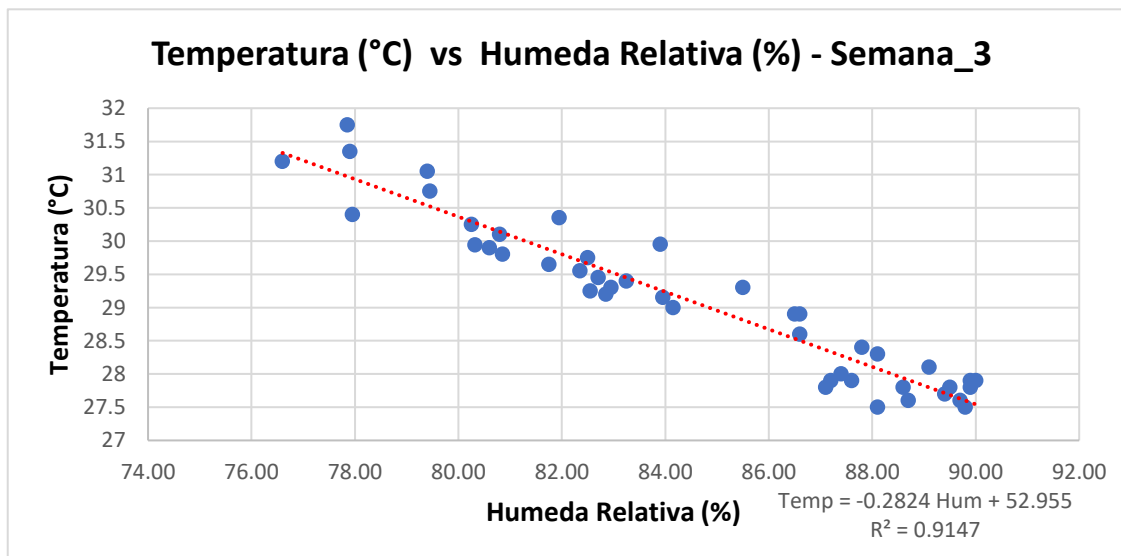


Figura 9

Relación entre temperatura y humedad relativa en un día de lluvia ligera

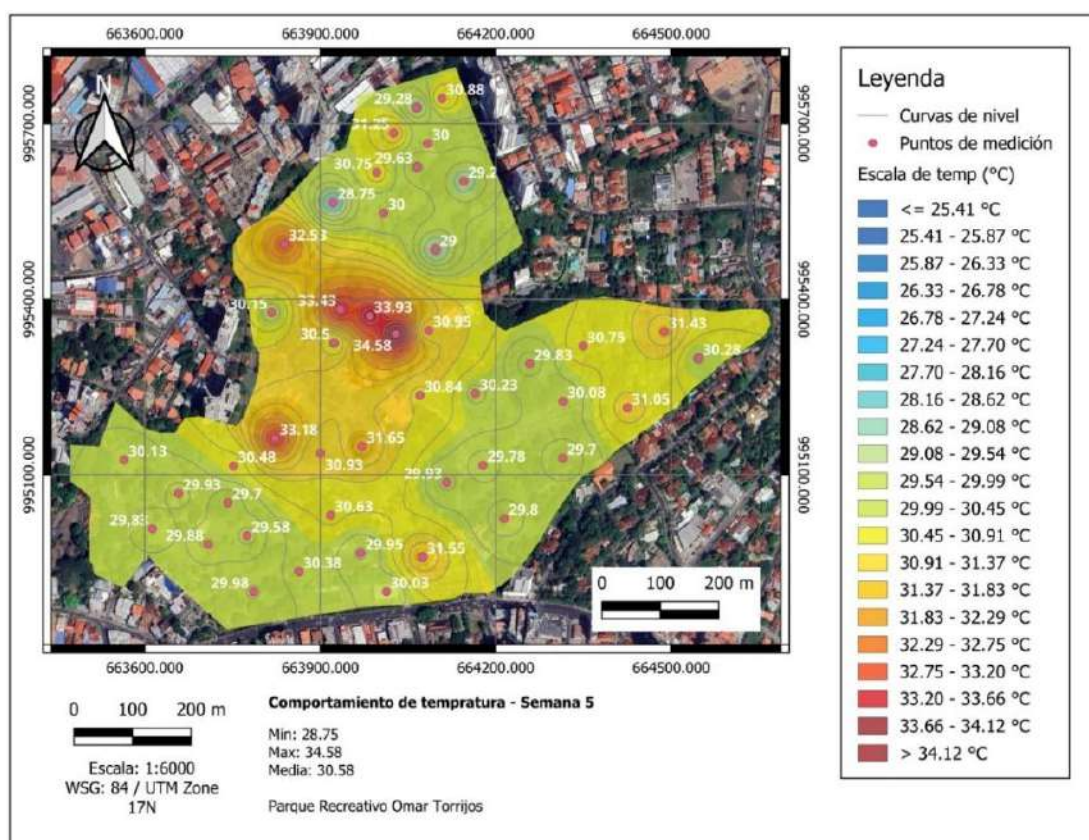


Durante los días soleados con cielo parcialmente despejado (Fig. 10), se registró una temperatura media de 30,58 °C, con máximos de hasta 34,58 °C en los sectores centrales (áreas 2 y 5). Estos valores superan ampliamente los rangos de confort térmico establecidos por la norma ASHRAE 55-2017, que sitúa el umbral de aceptabilidad en ambientes exteriores tropicales entre 26,0 °C y 28,0 °C bajo condiciones de alta humedad relativa.

En consecuencia, los usuarios de estas zonas experimentan estrés térmico moderado a alto, especialmente en áreas asfaltadas o con escasa sombra. En contraste, los sectores periféricos con mayor cobertura vegetal (27,5 °C –29,0 °C) ofrecen condiciones más cercanas al confort, actuando como refugios climáticos dentro del parque.

Figura 10

Mapa de isotermas y distribución espacial de temperaturas en un día soleado con cielo parcialmente despejado.

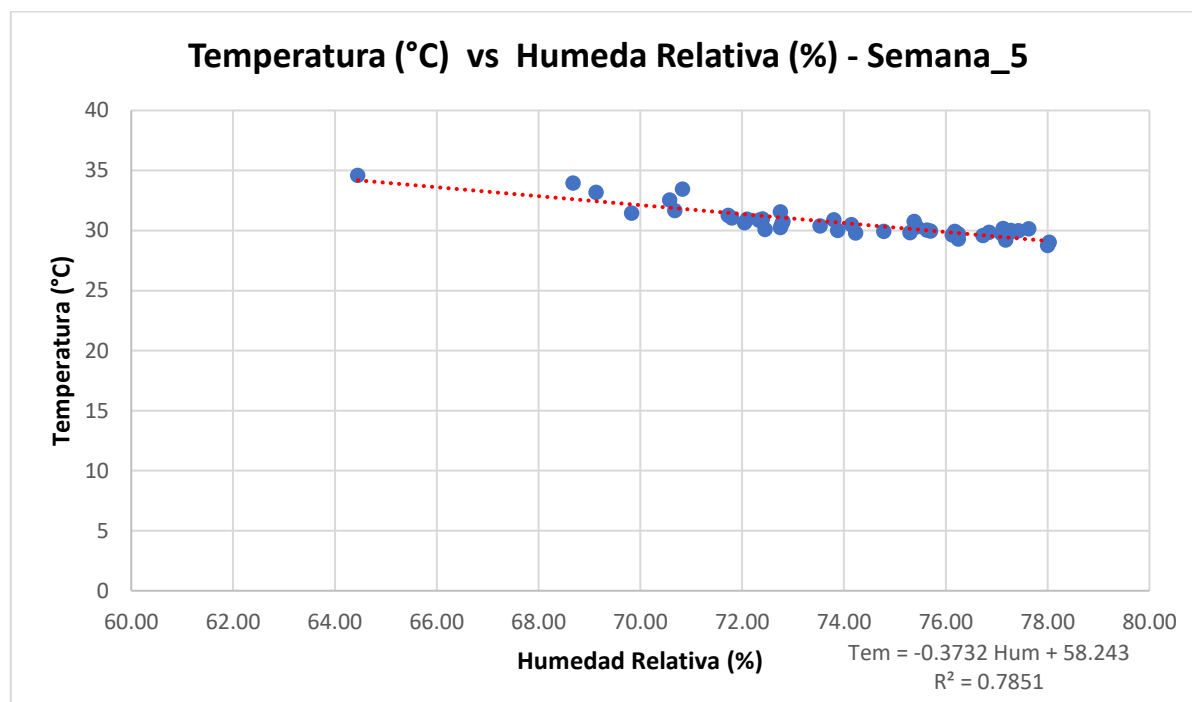


Bajo condiciones de cielo parcialmente despejado y radiación solar directa, se observó una disminución generalizada de la humedad relativa, con valores inferiores al 80 %, mientras que las temperaturas se mantuvieron dentro de rangos medios a altos. Las áreas 2 y 5 registraron los valores térmicos más elevados, asociados a una menor cobertura vegetal, en tanto que el área 6 presentó una mayor humedad relativa, evidenciando su capacidad de regulación microclimática (Fig. 10).

La dispersión de los datos reveló una marcada heterogeneidad térmica interna, coherente con lo expuesto por Oke (1982) respecto al efecto de isla de calor urbana, donde las variaciones en la cobertura del suelo y la vegetación generan contrastes significativos en las condiciones microclimáticas (Fig. 11).

Figura 11

Relación entre temperatura y humedad relativa en un día soleado con cielo parcialmente despejado.



La situación se intensifica en los días despejados (Fig. 12), cuando la temperatura media asciende a 31,31 °C y los máximos alcanzan 34,1 °C. La expansión de áreas con valores superiores a 31,0 °C indica que gran parte del parque se encuentra fuera de la zona de aceptabilidad térmica, lo que reduce drásticamente el confort percibido y aumenta la demanda de sombra, agua y espacios ventilados. Los núcleos cálidos se concentran en superficies duras y recreativas como el anfiteatro, las canchas y las áreas de juegos infantiles, mientras que las zonas con mayor densidad arbórea mantienen temperaturas más moderadas (30,0 °C – 30,5 °C), aunque todavía por encima del rango óptimo de confort.

Figura 12

Mapa de isotermas y distribución espacial de temperaturas en un día de lluvias soleado con cielo despejado.

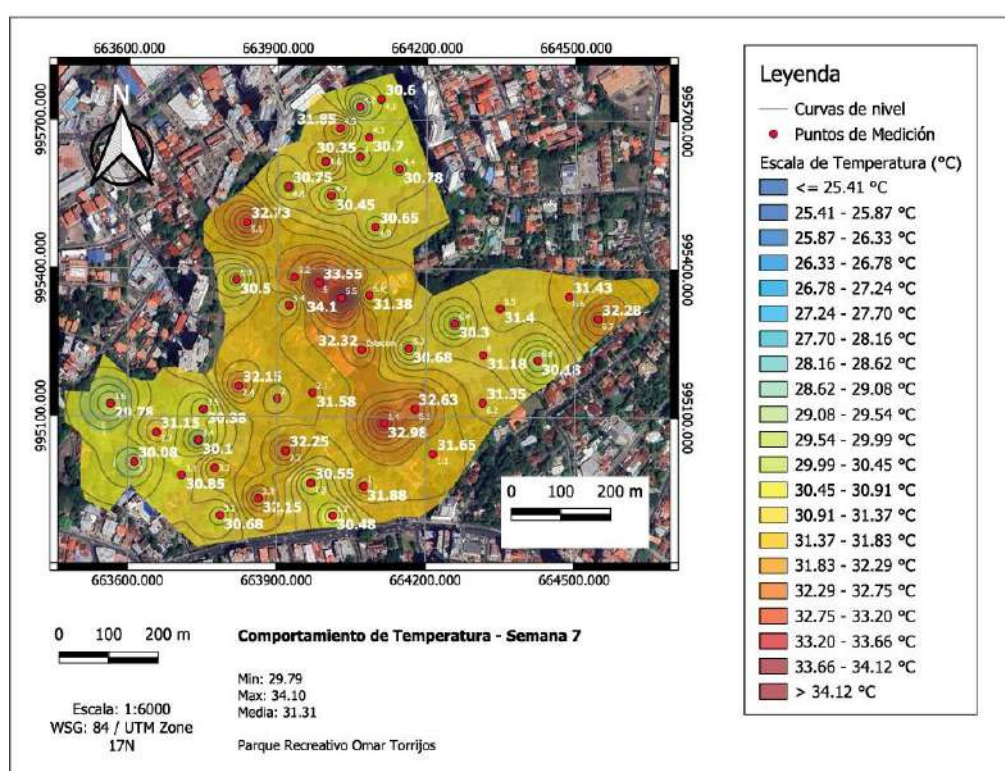
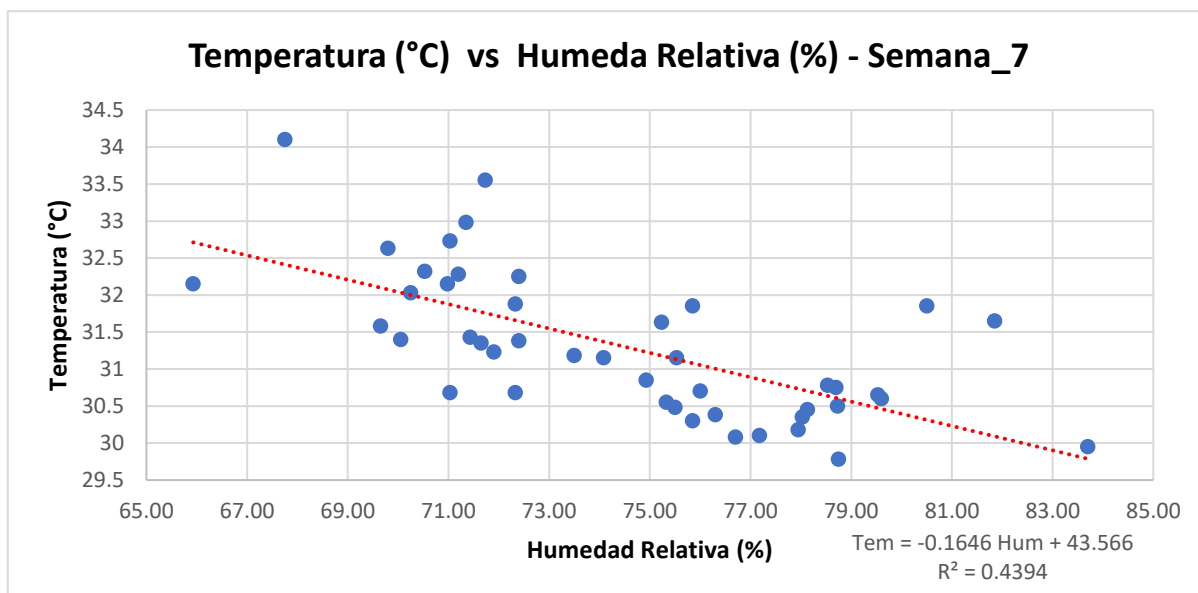


Figura 13

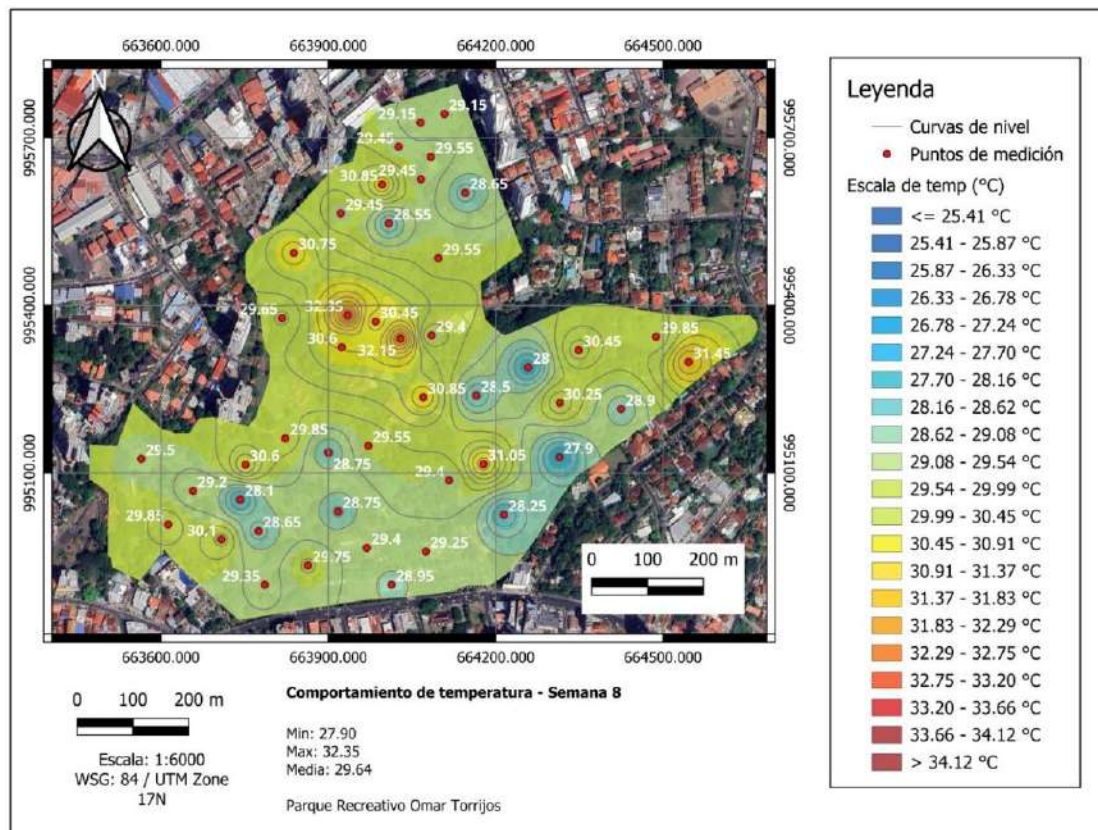
Relación entre temperatura y humedad relativa en un día soleado con cielo despejado



En un día soleado con cielo despejado, las condiciones se intensificaron, con temperaturas superiores a 30,0 °C en varias zonas y humedades también menores al 80 %. Nuevamente, los valores más críticos se concentraron en las áreas 2 y 5, confirmando su vulnerabilidad, mientras que el área 6 presentó condiciones más moderadas. La amplia variabilidad espacial coincidió con lo señalado por Emmanuel & Krüger (2012) acerca de la importancia de los espacios verdes en la resiliencia climática urbana. En conjunto, los resultados muestran un parque en fase de secado y calentamiento, con contrastes claros entre zonas que plantean implicaciones para la gestión pública y la conservación ecológica (Fig 13).

Figura 14

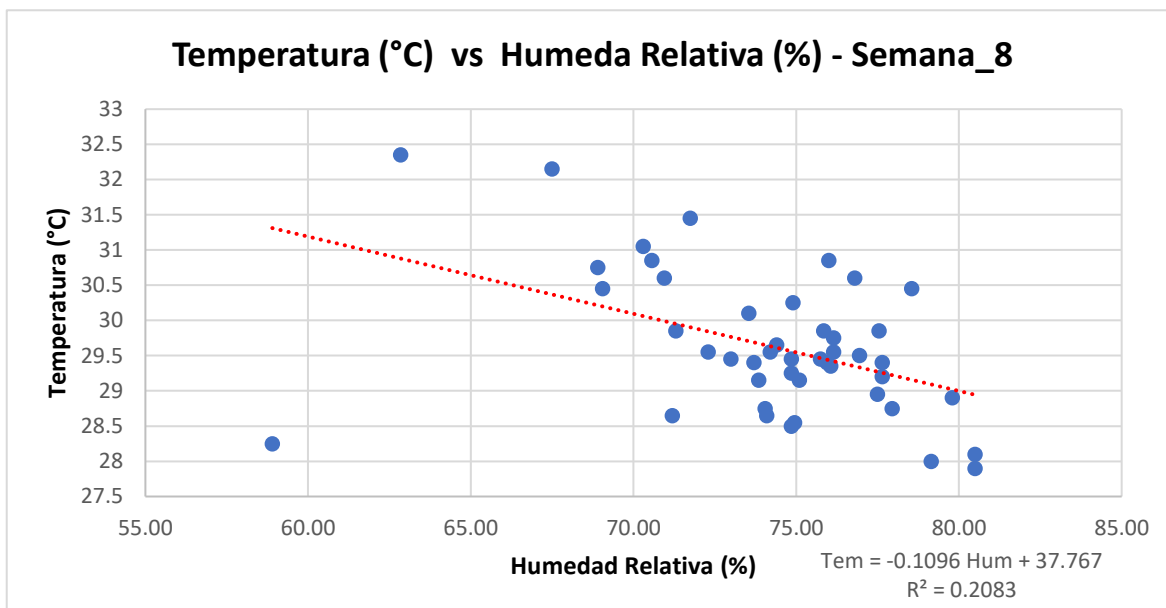
Mapa de isotermas y distribución espacial de temperaturas en un día soleado totalmente nublado.



El día soleado con presencia de nubosidad evidenció un comportamiento mixto, caracterizado por temperaturas que oscilaron entre rangos medios y altos, junto con niveles de humedad relativa que fluctuaron entre valores moderados y elevados. Este patrón apunta a una fase de transición, posiblemente asociada a variaciones estacionales o a la alternancia entre días soleados y lluviosos. En este contexto, las áreas 3 y 4 presentaron una mayor dispersión, lo que refleja una marcada variabilidad interna en la respuesta climática. En contraste, el área 1 mostró una distribución más compacta, lo que refuerza la percepción de homogeneidad en sus condiciones (Fig. 14).

Figura 15

Relación entre temperatura y humedad relativa en un día soleado nublado.



La relación entre temperatura y humedad relativa mantuvo una correlación negativa, aunque con menor intensidad que en semanas previas, lo que sugiere la influencia de factores adicionales en la modulación de esta interacción (Fig 15). Este comportamiento se alinea con lo planteado por Wilks (2011), quien resalta la utilidad de los análisis de series temporales para identificar transiciones climáticas. Asimismo, la resiliencia observada en ciertas zonas coincide con lo documentado por Bowler et al. (2010), quienes destacan la capacidad de los parques urbanos para amortiguar las fluctuaciones térmicas.

CONCLUSIONES

El análisis microclimático del Parque Recreativo Omar evidenció una marcada heterogeneidad espacial de las temperaturas, directamente condicionada por el tipo de cobertura y el uso del suelo. Durante las ocho semanas de medición, la temperatura promedio osciló entre 28,51 °C y 31,24 °C, con una media general de 29,47 °C, diferencia que, aunque aparentemente reducida, resulta significativa en términos de percepción de confort térmico bajo un clima tropical húmedo como el de Ciudad de Panamá.

Los resultados confirmaron que las áreas con alta densidad arbórea y presencia de cuerpos de agua, como los senderos sombreados, los gazebos y las zonas de piscina, registraron los valores más bajos de temperatura (28,7 °C–29,3 °C), actuando como refugios climáticos naturales dentro del parque. En contraste, las superficies asfaltadas, los estacionamientos y

los espacios recreativos abiertos, entre ellos el anfiteatro y las canchas sintéticas, presentaron temperaturas superiores a los 30,5 °C, configurándose como focos locales del efecto de isla de calor urbana.

La correlación negativa entre temperatura y humedad relativa ($R^2 > 0.9$ en días soleados despejados) refuerza la influencia de la radiación solar y la cobertura vegetal sobre las condiciones de confort. Las áreas con menor vegetación mantuvieron humedades relativas reducidas (<80 %), intensificando la sensación térmica, mientras que los sectores arbolados retuvieron mayor humedad, amortiguando las fluctuaciones térmicas y confirmando su papel regulador.

Asimismo, los valores máximos registrados durante jornadas soleadas y de cielo despejado, que alcanzaron hasta 34,6 °C en los sectores centrales del parque, superan ampliamente los umbrales de aceptabilidad térmica establecidos por la norma ASHRAE 55-2017 para climas tropicales húmedos (26,0 °C–28,0 °C). Este resultado sugiere que los usuarios de diversas zonas del parque experimentan niveles de estrés térmico moderado a alto, lo que puede tener implicaciones directas en la planificación de actividades recreativas, la gestión del espacio público y la salud ambiental urbana.

En conjunto, estos hallazgos demuestran que el parque, aunque ofrece sectores con microclimas confortables, también concentra núcleos cálidos que reducen la calidad ambiental. El fortalecimiento de la infraestructura verde, mediante el incremento del arbolado, la incorporación de cubiertas ligeras y el uso de materiales permeables en superficies duras, se proyecta como una estrategia prioritaria para mitigar el efecto de isla de calor, mejorar el confort térmico y asegurar la sostenibilidad del espacio urbano.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece a la administración del Parque Recreativo y Cultural Omar y al despacho de la primera dama, en especial a la directora María del Carmen Salaverry de Garuz, por la autorización y apoyo brindado para la realización de las mediciones climáticas.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Achebak, H., De'Donato, F., & Ballester, J. (2023). Impact of heat on mortality due to heat stroke in Spain: A national time-series analysis. *Environmental Health*, 22(1), 23. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/37757878>
- Aghamolaei, R., y Lak, A. (2023). Outdoor Thermal Comfort for Active Ageing in Urban Open Spaces: Reviewing the Concepts and Parameters. *Ageing Int*, 48, 438-451. <https://doi.org/10.1007/s12126-022-09482-w>



- Andreou, E. (2013). Thermal comfort in outdoor spaces and urban canyon microclimate. *Renewable Energy*, 55, 182–188. <https://doi.org/10.1016/J.RENENE.2012.12.040>
- ASHRAE. (2017). ANSI/ASHRAE Standard 55-2017: Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers.
- Austin-Ortega, D., Mora, D. & Chen, M. (2023). *Estimación del nivel de arborización para edificaciones en clima tropical: Enfoque estadístico y simulación dinámica*. I+D Tecnológico. Vol.19, No.1, 48-60.
- Bowler, D. E., Buyung-Ali, L., Knight, T. M., & Pullin, A. S. (2010). Urban greening to cool towns and cities: A systematic review of the empirical evidence. *Landscape and Urban Planning*, 97(3), 147–155. <https://doi.org/10.1016/J.LANDURBPLAN.2010.05.006>
- Candanedo, M. & Villarreal, D. (2020). *Efecto de las islas de calor urbano en las principales vías de la Ciudad de Panamá*. I+D Tecnológico, 16(2), 25-36. <http://doi.org/10.33412/idt.v16.2.2829>
- Cárdenas, L. (2012). Caracterización de patrones bioclimáticos en tejidos urbanos residenciales. *Cuadernos de Investigación Urbanística*, 82, Article 82. 90 <http://polired.upm.es/index.php/ciur/article/view/1840>
- Córdova, K. (2011). Impactos de las islas térmicas o islas de calor urbano, en el ambiente y la salud humana. Análisis estacional comparativo: Caracas, octubre – 2009, marzo – 2010. *Terra Nueva Etapa*, 27(42), 95-122. Recuperado de <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=72121706005>
- Cuellar, K., López, A., Montenegro, R., Ramos, M. & Perén, J. (2021). *Estudio de la morfología urbana del sector de Punta Paitilla*. *SusBCity*, 3(1), 39–43. Recuperado a partir de <https://revistas.up.ac.pa/index.php/SusBCity/article/view/2010>
- Dirección de Planificación Urbana (DPU), Alcaldía de Panamá. (2025). *Informe técnico de la propuesta de zonificación del corregimiento de San Francisco*. Alcaldía de Panamá.
- Duval, V. S., Benedetti, M., & Baudis, K. (2020). *El impacto del arbolado de alineación en el microclima urbano: Bahía Blanca*. Investigaciones Geográficas.
- Emilsson, T. (2021). Urban life and climate change. *The Impacts of Climate Change: A Comprehensive Study of Physical, Biophysical, Social, and Political Issues*, 453–462. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-822373-4.00009-4>



- Emmanuel & Krüger (2012). Urban heat island and climate resilience in Glasgow.
- Fanger, P. O. (1972). Thermal comfort. Analysis and applications in environmental engineering. CABI Digital Library. <https://n9.cl/nlgggt>
- Fiol, I., Núñez, J., Rodríguez, A., Sarmiento, A., Gómez, M. & Sánchez-Galán, J. *Análisis Geoespacial Multitemporal de la Relación Entre Cobertura Boscosa y Sensación térmica en área Urbana de la Ciudad de Panamá. IEEE Central America and Panama Student Conference (CONESCAPAN)*, Panama, Panama, (2024). 1-6 doi: 10.1109/CONESCAPAN62181.2024.10891102.
- Flores-de la O. (2018). Evaluación de los efectos micro climáticos que tiene la vegetación en la mitigación de la isla de calor urbana. *Revista de Ciencias Ambientales*, 52, 123–140. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=665070590008>
- Fluke Corporation. (2005). *Fluke 971 temperature humidity meter: User's manual* (Rev. 1, September 2005). Fluke Corporation. <https://www.fluke.com/>
- García, A. (2017). *Efectos de las islas de calor y de frío en parques urbanos: implicancias para la planificación urbana y la calidad ambiental*. Tesis de Maestría. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Gómez, H., Rojas, I., & Perén, J. (2021). *Una aproximación a los efectos del diseño urbano en el microclima y calidad de espacios urbanos de una ciudad cálida-húmeda: Panamá*. *SusBCity*, Vol.3, No.1, 31-38.
- He, B. J., Zhao, D., Dong, X., Xiong, K., Feng, C., Qi, Q., Darko, A., Sharifi, A., & Pathak, M. (2022). Perception, physiological and psychological impacts, adaptive awareness and knowledge, and climate justice under urban heat: A study in extremely hot-humid Chongqing, China. *Sustainable Cities and Society*, 79, 103685. <https://doi.org/10.1016/J.SCS.2022.103685>
- Jiang, J., Wang, D., Liu, Y., Di, Y., & Liu, J. (2021). A holistic approach to the evaluation of the indoor temperature based on thermal comfort and learning performance. *Building and Environment*, 196, 107803. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.107803>
- Jin, H., Cui, P., Wong, N. H., y Ignatius, M. (2018). Assessing the effects of urban morphology parameters on microclimate in Singapore to control the urban heat island effect. *Sustainability*, 10(1), 206. doi: 10.3390/su10010206



- Khan, A., Chatterjee, S., & Weng, Y. (2021). Scaling UHI and microclimate environment. *Urban Heat Island Modeling for Tropical Climates*, 117–152. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819669-4.00004-0>
- Lima, E. D., y Lopes, A. (2017). The urban heat island effect and the role of vegetation to address the negative impacts of local climate changes in a small Brazilian city. *Atmosphere*, 8(2), 18. doi: 10.3390/atmos8020018
- Lin, T.-P. (2009). Thermal perception, adaptation and attendance in a public square in hot and humid regions. *Building and Environment*, 44(10), 2017–2026. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2009.02.004>
- Lindén, J., Fonti, P., y Esper, J. (2016). Temporal variations in microclimate cooling induced by urban trees in Mainz, Germany. *Urban Forestry & Urban Greening*, 20, 198-209. doi:10.1016/j.ufug.2016.09.001
- Liu, Z., Li, J., & Xi, T. (2023). A Review of Thermal Comfort Evaluation and Improvement in Urban Outdoor Spaces. *Buildings*, 13(12), 3050. <https://doi.org/10.3390/buildings13123050>
- Martini, A., Biondi, D., y Batista, A. C. (2017). Urban forest components influencing microclimate and cooling potential. *Revista Arvore*, 41(6), e410603. doi: 10.1590/1806-90882017000600003
- Mendes da Silva, A. C., & Romero, M. A. B. (2021). *Microclimas urbanos en la Ciudad de Panamá: estudio de tres recortes históricos de la ocupación urbana*. <http://doi.org/10.18830/issn.1679-0944.30.2021.03>
- Ministerio de Ambiente de Panamá. (2019). Inventario forestal del Parque Omar: Reglamento y manual de procedimiento. Panamá City: Ministerio de Ambiente de Panamá.
- Ministerio de la Presidencia. (2022, October 5). *Decreto Ejecutivo No. 2362: Que adopta el reglamento de operación y funcionamiento del Parque Recreativo y Cultural Omar*. Gaceta Oficial Digital, No. 28627.
- Ng, E., Chen, L., Wang, Y., & Yuan, C. (2012). A study on the cooling effects of greening in a high-density city: An experience from Hong Kong. *Building and Environment*, 47(1), 256–271. <https://doi.org/10.1016/J.BUILDENV.2011.07.014>



- Nikolopoulou, M., & Steemers, K. (2003). Thermal comfort and psychological adaptation as a guide for designing urban spaces. *Energy and Buildings*, 35(1), 95–101. [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(02\)00084-1](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(02)00084-1)
- O., J. L. F.-D. la, Villanueva-Solis, J., & Quiroa-Herrera, J. A. (2018). Evaluación de los efectos microclimáticos que tiene la vegetación en la mitigación de la isla de calor urbana: Parque en la ciudad de Torreón, México. *Ciencias Ambientales*, 52(2), 16. <https://doi.org/10.15359/RCA.52-2.7>
- Oke, T. R. (2006). *Boundary Layer Climates* (2nd ed.). Routledge.
- Ramírez, M., & Torres, D. (2021). Efecto de la vegetación en microclimas urbanos tropicales. *Revista de Ecología Urbana*, 15(1), 21–35.
- Oke, T.R. (1982). The energetic basis of the urban heat island.
- Organización Internacional de Normalización (ISO). (2005). ISO 7730:2005 Ergonomía de los ambientes térmicos - Determinación analítica e interpretación del confort térmico mediante el cálculo de los índices PMV y PPD y los criterios de confort térmico local. <https://n9.cl/tepib>
- Ortega, F. (2018). *Isla de calor urbana de Santiago y microclima en el espacio público: De la medición a la percepción. El caso del Barrio Italia en la comuna de Providencia, Chile* (Tesis de Magíster). Universidad de Chile.
- Osorio, H. (12 de febrero de 2021). *Bosques urbanos, una mirada al eje verde de las ciudades*. La Estrella de Panamá.
- Perén, J., Rodríguez, M., Valdivieso, K., Vargas, B., Medina, D., Ojeda, J., & Cedeño, J. (2022). *Influencia de la Vegetación en dos Sectores del Corregimiento de Calidonia*. SusBCity, Vol.4, No.1, 53-63.
- Ruiz, M. A., Correa, E. N. y Cantón, M. A. (2015). Incidencia de la selección de la especie forestal en el confort térmico de cañones urbanos de zonas áridas: El caso de Mendoza, Argentina. *Urbano* 18(32), 60-70. Recuperado de <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=19844017007>
- Santamaría, J. F. (2018). *Clima urbano y vegetación: Influencias en la mitigación del calor urbano*. Editorial Académica Española.
- Santamouris, M. (2015). Analyzing the heat island magnitude and characteristics.



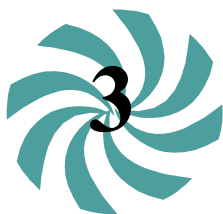
- Sayad, B., Alkama, D., Ahmad, H., Baili, J., Aljahdaly, N. H., & Menni, Y. (2021). Nature-based solutions to improve the summer thermal comfort outdoors. *Case Studies in Thermal Engineering*, 28, 101399. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2021.101399>
- Shashua-Bar, L., Tsiros, I. X., & Hoffman, M. E. (2010). A modeling study for evaluating passive cooling scenarios in urban streets with trees. Case study: Athens, Greece. *Building and Environment*, 45(12), 2798–2807. <https://doi.org/10.1016/J.BUILDENV.2010.06.008>
- Stewart, I. D., & Oke, T. R. (2012). Local Climate Zones for Urban Temperature Studies. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 93(12), 1879–1900. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-11-00019.1>
- Silva, L. F., Carvalho, M. M., & Nunes, B. (2024). Extreme heat and hospitalizations due to infectious and renal diseases: a multi-city study in Portugal and Brazil. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 21(4), 1132. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC11517055/>
- Soto, J. A. (02 de septiembre de 2011). *Las áreas verdes urbanas: Una alternativa para mejorar el microclima urbano*. Otro mundo es posible. Recuperado el 02 de octubre de 2016, de <http://www.otromundoesposible.net/las-areas-verdes-urbanas-una-alternativa-para-mejorar-el-microclima-urbano/>
- Spagnolo, J., & de Dear, R. (2003). A field study of thermal comfort in outdoor and semi-outdoor environments in subtropical Sydney Australia. *Building and Environment*, 38(5), 721–738. [https://doi.org/10.1016/S0360-1323\(02\)00209-3](https://doi.org/10.1016/S0360-1323(02)00209-3)
- Therán Nieto, J., Pérez Martínez, E., & Gil Botero, R. (2019). *Evidencias de la isla de calor urbana en la ciudad de Medellín*. *Revista EIA*, 16(32), 1–16.
- Valenzuela, P. (2021). Comparación del Índice de Temperatura Equivalente Fisiológica (PET) y el Índice Universal de Clima Térmico (UTCI) en el análisis del confort térmico urbano. *Revista de Climatología Aplicada*, 14(1), 91–105.
- Villarreal, Y., Martínez, D., Samaniego, A. & Perén, J. (2023). *Estudio de la temperatura superficial en pavimentos según el tipo de material en la zona de Ancón bajo condiciones de sol y sombra*. *SusBCity*, Vol.5, No.1, 27-32.
- Wald, O., Sánchez, A., Ayarza, G., Barranco, N. & Perén, J. (2021). *Influencia de la morfología urbana en el microclima de los alrededores de calle 50, en ciudad de Panamá*. *SusBCity*, Vol.3, No.1, 16-24.



Wilks, D. S. (2011). Time Series. *International Geophysics*, 100, 395–456.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-385022-5.00009-9>

Zhang, Y., Yu, C., Wang, L., et al. (2022). Heat-related illness and death: a systematic review and meta-analysis. *Science of The Total Environment*, 845, 157209.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.157209>





Efectos de la experiencia docente y otros contextos en matemáticas de estudiantes en octavo grado

Effects of teaching experience and other contexts on mathematics of eighth-grade students

Roberto A. Martínez C.

Universidad de Panamá, Facultad de Ciencias Naturales, Exactas y Tecnología, Departamento de Matemáticas, Panamá.

roberto.martinezc@up.ac.pa

<https://orcid.org/0000-0001-6302-0787>

Fecha de recepción: 25 de septiembre de 2025

Fecha de aceptación: 21 de abril de 2026

DOI: <https://doi.org/10.48204/j.tecno.v8n2.a10838>

RESUMEN

Esta investigación examinó los efectos de la experiencia docente y factores contextuales en el rendimiento matemático de estudiantes de octavo grado utilizando datos de e-TIMSS 2019. El estudio aplicó Modelos Jerárquicos Lineales (HLM) para analizar el efecto de los años de experiencia docente en 22 países y los efectos del énfasis escolar en el éxito académico y las limitaciones percibidas en la enseñanza debido a las necesidades estudiantiles en ocho países. Los hallazgos revelaron un impacto variado de los años de experiencia docente sobre el rendimiento estudiantil; en países como Taipéi Chino y Turquía, los efectos fueron positivos, mientras que en otros países, como los Emiratos Árabes Unidos, las asociaciones fueron negativas. Los factores contextuales del énfasis escolar en el éxito académico y la menor percepción de necesidades estudiantiles que limitan la enseñanza se asociaron consistentemente de forma positiva con el rendimiento de los estudiantes. En general, los resultados destacaron la posible necesidad de desarrollo profesional continuo y disponibilidad de recursos para optimizar las prácticas docentes. Esta investigación contribuyó a las políticas educativas globales al subrayar los efectos de los factores docentes que podrían influir en el rendimiento matemático de los estudiantes.

PALABRAS CLAVE

Educación secundaria, rendimiento matemático, experiencia docente, factores contextuales, modelado jerárquico.



ABSTRACT

This research examined the effects of teaching experience and contextual factors on eighth-grade students' mathematics achievement using data from e-TIMSS 2019. The study applied Hierarchical Linear Modeling (HLM) to examine the effect of years of teaching experience across 22 countries and the effects of school emphasis on academic success and perceived teaching limitations due to student needs across eight countries. Findings revealed varied impact of years of teaching experience on student achievement; in countries such as Chinese Taipei and Turkey, the effects were positive, while in other countries, such as the United Arab Emirates, associations were negative. The contextual factors of school emphasis on academic success and fewer perceived student needs limiting teaching were consistently positively associated with students' achievement. In general, findings highlighted the possible need of continuing professional development and availability of resources in optimizing teaching practices. This research contributed to global education policies by underscoring the effects of teacher factors that could influence students' mathematics achievement.

KEYWORDS

Middle school education, mathematics achievement, teaching experience, contextual factors, hierarchical modeling.

INTRODUCCIÓN

Mejorar el rendimiento en matemáticas en la educación secundaria sigue siendo un objetivo importante para los sistemas educativos en todo el mundo. La competencia en matemáticas juega un papel en el éxito profesional futuro, especialmente en la sociedad tecnológica actual. A medida que las personas en todo el mundo dependen más de los datos y la tecnología, el conocimiento en matemáticas se vuelve más esencial. De hecho, esta competencia permite a los individuos involucrarse significativamente con las demandas de una sociedad impulsada por la información.

Investigaciones como el estudio Trends in International Mathematics and Science Study (TIMSS) 2019 han identificado algunos factores que influyen en el rendimiento estudiantil, incluyendo recursos escolares, prácticas en el aula y calidad docente. Los profesores con más experiencia a menudo demuestran habilidades más fuertes en el manejo del aula, pueden ajustar de manera más efectiva las estrategias de instrucción y fomentan un compromiso más profundo de los estudiantes con las matemáticas. Por lo tanto, no es sorprendente que, en múltiples países, los años de experiencia docente puedan tener un impacto significativo en el aprendizaje estudiantil.

Este trabajo se enfoca en la relación entre los años de experiencia docente y el rendimiento en matemáticas de estudiantes de octavo grado, usando datos de TIMSS 2019. TIMSS provee datos valiosos sobre el desempeño estudiantil en más de 60 países, incluyendo variables como el énfasis escolar en el éxito académico y las limitaciones percibidas en la



enseñanza debido a las necesidades de aprendizaje de los estudiantes. Al aprovechar este amplio conjunto de datos, esta investigación ofrece perspectivas sobre cómo la experiencia docente y otras variables contextuales en los entornos de los profesores de matemáticas se asocian con el rendimiento matemático a nivel global. La pregunta de investigación que se aborda es: ¿Cuáles son los efectos de los años de experiencia docente y las variables contextuales del aula en el rendimiento matemático de estudiantes de octavo grado en los países de e-TIMSS 2019?

En este estudio, se aplica el Modelado Lineal Jerárquico (HLM) para analizar los datos. A diferencia de las técnicas tradicionales de regresión, HLM considera la estructura anidada de los datos, reconociendo que el rendimiento estudiantil está influenciado tanto por características individuales como por el contexto del docente (escuela). Este enfoque permite analizar las variaciones dentro y entre docentes en el rendimiento, mostrando cómo la influencia de la experiencia docente en el éxito estudiantil está moderada por diferentes entornos escolares y políticas.

El valor de esta investigación radica en su potencial para informar políticas educativas basadas en los datos de TIMSS 2019. Al identificar cómo la experiencia docente y otras variables contextuales impactan el desempeño estudiantil en diversos países, este trabajo provee evidencia que puede guiar a escuelas y líderes educativos en la optimización y mejora de prácticas escolares que apoyen mejor el rendimiento en matemáticas. Los resultados de este estudio también contribuyen a la literatura más amplia sobre la efectividad docente y el éxito estudiantil para mejorar la competencia matemática en estudiantes de educación secundaria.

Antecedentes

Impacto de la experiencia docente en el rendimiento estudiantil

Según Lindström et al. (2024), un indicador crítico de la competencia docente es la experiencia del profesor. Lindström et al. (2024) discuten la relación entre la experiencia docente y el rendimiento estudiantil, señalando estudios recientes que han sugerido que la trayectoria profesional de un profesor contribuye a mejorar los resultados de los estudiantes. Sin embargo, Toropova et al. (2019) diferencian entre los primeros años de experiencia y los posteriores, sugiriendo una relación o asociación curvilínea. Específicamente, Toropova et al. (2019) encontraron que, a medida que aumentaban los años de experiencia docente, el rendimiento estudiantil aumentaba durante los primeros diecinueve años y luego disminuía. Estos hallazgos coinciden con investigaciones que sugieren que la experiencia tiene el mayor impacto durante los primeros años de enseñanza (Clotfelter et al., 2007; Goe, 2007). En contraste, sin embargo, Coenen et al. (2018) sostienen que la relación persiste a lo largo de toda la carrera del profesor.

Goe (2007) señala que los hallazgos de los estudios sobre la relación entre experiencia docente y rendimiento estudiantil varían según el nivel de grado y el área temática, y a veces



no son prácticamente significativos. Aunque, como se indicó anteriormente, numerosos estudios han documentado una relación fuerte y positiva entre los años de experiencia y el desempeño de los estudiantes, otros han reportado efectos moderados o incluso insignificantes (p. ej., Shuls & Trivitt, 2015; Gustafsson & Nilsen, 2016). Es posible que estas diferencias en los resultados se deban a factores contextuales específicos de cada país y/o a diferencias en la consideración de los contextos escolares, ambos aspectos que abordará este estudio.

En el contexto de las matemáticas, la evidencia sugiere que los estudiantes con mayor rendimiento tienden a ser enseñados por docentes con más experiencia, lo cual se observa en los estudios TIMSS (Blömeke et al., 2016; Hill, 2007). Además, Blömeke et al. (2016) observaron que tanto el rendimiento estudiantil como la calidad de la instrucción estaban relacionados con los años de experiencia docente. De manera similar, Şahin y Öztürk (2018) utilizaron datos de TIMSS para demostrar que los docentes experimentados, especialmente aquellos que han desarrollado habilidades especializadas (nivel educativo), contribuyen significativamente al éxito de los estudiantes (p. 560). Lindström et al. (2024) encontraron relaciones similares, pero señalaron un posible efecto de selección, es decir, que los docentes con más experiencia tendían a concentrarse en escuelas que atendían a estudiantes más favorecidos (y, por lo tanto, con mayor rendimiento). Así, la dirección de la relación entre el rendimiento estudiantil y la experiencia docente no está del todo clara. Una hipótesis es que la pericia del profesor desempeña un papel crucial en la planificación de la instrucción que promueve la comprensión de conceptos complejos. Sin embargo, una hipótesis alternativa plausible es que los docentes con más experiencia tienden a postularse y ser contratados en escuelas que atienden a estudiantes de mayor rendimiento.

La experiencia docente puede conducir a prácticas de enseñanza más efectivas que evolucionan a lo largo del tiempo en la medida en que los profesores acumulan percepciones de la experiencia en el aula y de la formación profesional. De hecho, el desarrollo profesional es crucial para mejorar la enseñanza, ya que se trata de un aprendizaje a largo plazo orientado a abordar las necesidades de instrucción de los docentes. Corven et al. (2022) encontraron que los profesores de matemáticas en servicio continúan adquiriendo conocimiento especializado de contenido para la enseñanza de las matemáticas más allá del tiempo de instrucción de la formación inicial, a través del desarrollo profesional y la experiencia en la enseñanza del contenido. Jacobs et al. (2010) también observaron diferencias entre docentes novatos y experimentados en su capacidad para percibir el pensamiento de los estudiantes, un factor clave en la enseñanza de matemáticas de manera receptiva. Los resultados de estos estudios sugerirían que, si todos los demás factores se mantienen iguales, los docentes con más experiencia tienen más probabilidades de promover un mayor rendimiento estudiantil.

Énfasis en el éxito académico



El énfasis de la escuela en el éxito académico se manifiesta a menudo a través de la eficacia colectiva docente, teniendo una influencia significativa en el rendimiento estudiantil. Según Goddard et al. (2000), la eficacia colectiva docente promueve una cultura colaborativa donde los profesores trabajan juntos para alcanzar altos estándares académicos, impactando positivamente en los resultados de aprendizaje de los estudiantes. Lindström et al. (2024) también destacan que las escuelas con metas académicas sólidas respaldan la efectividad de los docentes experimentados, permitiéndoles concentrarse en los estándares curriculares que se alinean con los objetivos educativos a nivel institucional.

Los datos de TIMSS resaltan la importancia del enfoque académico de una escuela en la mejora del rendimiento estudiantil. Las escuelas desempeñan un papel crucial en la formación de los resultados de los estudiantes, particularmente en materias como matemáticas. Aru y Kale (2019) describen a las escuelas con un fuerte enfoque académico como entornos que priorizan estándares rigurosos y proporcionan a los docentes los recursos y el apoyo necesarios. Este énfasis permite que las escuelas tengan una cultura colaborativa donde tanto los esfuerzos administrativos como las prácticas docentes se alinean hacia metas educativas comunes, contribuyendo en última instancia a niveles más altos de rendimiento estudiantil. También destacan que los estudiantes tienen un mejor desempeño en escuelas donde se enfatiza el éxito académico porque cuentan con un ambiente seguro y disciplinado, lo que permite a los docentes concentrarse en la calidad de la instrucción en lugar de en desafíos relacionados con la falta de apoyo (Aru & Kale, 2019). Şahin y Öztürk (2018) agregan que el compromiso institucional con la excelencia académica permite a los docentes emplear plenamente su pericia e impactar positivamente en los resultados de aprendizaje de los estudiantes. Este compromiso con el éxito académico beneficia a los estudiantes al proporcionar un entorno de aprendizaje de apoyo y permitir que los docentes maximicen su efectividad instruccional, amplificando el impacto positivo de la experiencia docente en el desempeño estudiantil.

Limitaciones percibidas en la enseñanza debido a las necesidades de los estudiantes

Los estudiantes tienen una variedad de necesidades dentro del aula que pueden crear limitaciones para la efectividad de la enseñanza, principalmente cuando los profesores no cuentan con el apoyo adecuado para atender esas necesidades. TIMSS 2019 preguntó a los docentes sobre la prevalencia de factores que podrían limitar la enseñanza efectiva, tales como la falta de conocimientos o habilidades previas por parte de los estudiantes, insuficiente nutrición básica, falta de sueño, ausencias frecuentes, conductas disruptivas, falta de interés, discapacidades mentales o emocionales, y dificultades para comprender el idioma de instrucción (Martin et al., 2020). TIMSS resume todos estos factores en la escala *Classroom Teaching Limited by Students Not Ready for Instruction*. Un puntaje más alto en esta escala indica que existen pocas limitaciones percibidas, mientras que puntajes más bajos indican mayores limitaciones.



En muchas escuelas, los docentes enfrentan el reto de equilibrar los objetivos de instrucción con la adaptación a los requerimientos individuales de los estudiantes, lo que puede impactar en la consistencia y calidad de la enseñanza. Lindström et al. (2024) sugieren que, si bien los docentes experimentados a menudo desarrollan estrategias adaptativas para atender distintas necesidades, aún pueden encontrarse con barreras sin un apoyo institucional suficiente. Esta limitación se encuentra principalmente en aulas con altos niveles de diversidad en las habilidades y antecedentes de los estudiantes, donde los docentes deben modificar con frecuencia sus enfoques de enseñanza para adaptarse a las necesidades de aprendizaje. Tales condiciones pueden reducir la efectividad general incluso de los educadores más experimentados, ya que la gestión de retos específicos de los estudiantes puede desviar la atención de los objetivos de instrucción. Las escuelas que priorizan recursos para apoyar las diversas necesidades de aprendizaje permiten a los docentes concentrarse más plenamente en los estándares curriculares para mejorar el entorno de aprendizaje (Goddard et al., 2000).

Los docentes a menudo tienen limitaciones para atender las diversas necesidades de los estudiantes, lo que puede afectar su capacidad para ofrecer una enseñanza consistente y efectiva. En particular, los profesores en aulas con diferentes necesidades académicas y sociales pueden enfrentar barreras para proporcionar apoyo individualizado sin recursos ni respaldo suficientes. Aru y Kale (2019) señalan la importancia de dotar a las escuelas de medios para atender eficazmente las necesidades estudiantiles, destacando que la falta de recursos o de apoyo institucional puede obstaculizar las estrategias docentes para adaptarse a los requerimientos de los estudiantes. Cuando las escuelas carecen de estructuras de apoyo suficientes, los docentes a menudo no pueden atender plenamente necesidades específicas de los estudiantes, desviando su atención de los objetivos centrales de instrucción y reduciendo potencialmente su efectividad general (Aru & Kale, 2019). En consecuencia, las escuelas que priorizan el apoyo para atender las necesidades estudiantiles permiten que los profesores se concentren en una enseñanza de alta calidad y logren un mejor entorno de aprendizaje y resultados académicos.

TIMSS: Historia y función

TIMSS es administrado por la Asociación Internacional para la Evaluación del Logro Educativo (*International Association for the Evaluation of Educational Achievement*) y ha sido un instrumento clave en la evaluación educativa global desde 1995. TIMSS se lleva a cabo cada cuatro años con el objetivo de proporcionar datos comparativos sobre el rendimiento en matemáticas y ciencias de estudiantes de cuarto y octavo grado en distintos países. Este diseño permite monitorear cambios en el desempeño educativo a lo largo del tiempo, brindando a responsables de políticas, educadores e investigadores valiosos conocimientos sobre los factores que influyen en el rendimiento estudiantil. TIMSS se centra en las necesidades educativas y en los avances tecnológicos. La evaluación comenzó inicialmente como una prueba en papel, pero en 2019 TIMSS introdujo una versión digital, e-TIMSS, para adaptarse a los avances tecnológicos y ofrecer una mejor experiencia de datos.



La mitad de los países participantes optaron por e-TIMSS, mientras que los demás continuaron con el formato tradicional en papel (TIMSS & PIRLS International Study Center, 2019).

Una característica distintiva de TIMSS es su uso de un marco de evaluación integral que se revisa en colaboración con los países participantes en cada ciclo. Este marco incluye dominios de contenido y dominios cognitivos que reflejan las prioridades curriculares globales. Por ejemplo, el marco de matemáticas de TIMSS 2019 para octavo grado incluía los dominios de número, medida, geometría, datos, álgebra y probabilidad (TIMSS & PIRLS International Study Center, 2019). La estructura de este marco permite a TIMSS evaluar una amplia gama de conocimientos y habilidades, garantizando al mismo tiempo relevancia cultural y curricular entre las naciones participantes.

TIMSS también proporciona datos contextuales a través de cuestionarios detallados aplicados a estudiantes, docentes y directores de escuela. Este componente promueve la comprensión de cómo los entornos escolares, las prácticas docentes y el apoyo en el hogar contribuyen a los resultados de los estudiantes. Estas percepciones contextuales informan políticas educativas basadas en evidencia, ayudando a los países a identificar áreas de mejora y a promover entornos de aprendizaje más efectivos.

TIMSS es una herramienta significativa en la investigación educativa que proporcionará información importante en este estudio. En efecto, los datos de TIMSS 2019 constituyen la base para explorar cómo la experiencia docente y diversos factores contextuales a nivel del profesorado, como el énfasis en el éxito académico y las limitaciones percibidas en la enseñanza debido a las necesidades de los estudiantes, influyen en el rendimiento en matemáticas de los estudiantes de octavo grado en distintos países. A través de la aplicación de los sólidos datos y metodologías de TIMSS, esta investigación describirá relaciones que son generalizables en los sistemas educativos de los diferentes países que participaron en TIMSS 2019, permitiendo comprender los factores que apoyan el éxito o rendimiento de los estudiantes en matemáticas a nivel global.

MATERIALES Y MÉTODOS

La pregunta de investigación que abordo en este estudio es: ¿Cuáles son los efectos de los años de experiencia docente y del contexto de enseñanza en el logro en matemáticas de los estudiantes de octavo grado en los países de e-TIMSS 2019?

Este estudio amplía la comprensión de cómo la experiencia docente y el contexto de enseñanza influyen en el rendimiento matemático de los estudiantes en diversos sistemas



educativos internacionales. El presente análisis examina cómo factores a nivel de profesor, tales como años de experiencia, énfasis escolar en el éxito académico y limitaciones percibidas en la enseñanza, influyen en los resultados de matemáticas de octavo grado, utilizando datos de e-TIMSS 2019 y modelado jerárquico lineal (HLM). A diferencia de estudios previos, este análisis explora las relaciones en múltiples países, mostrando información sobre tendencias y variaciones globales. Los hallazgos ofrecen evidencia valiosa sobre el papel crítico tanto de la experiencia docente como de los entornos escolares en la construcción del logro estudiantil. Esta investigación contribuye a la aplicación de políticas y estrategias para mejorar la educación matemática a nivel global.

Alcance y recolección de datos

Este estudio utiliza datos del conjunto e-TIMSS 2019 sobre el rendimiento en matemáticas de octavo grado en 22 países. TIMSS proporciona un conjunto de datos completo con naturaleza jerárquica, donde los estudiantes están anidados dentro de las aulas, lo que lo hace ideal para el modelado jerárquico lineal (TIMSS & PIRLS International Study Center, 2019). El análisis se limita a enfocarse en el rendimiento en matemáticas de octavo grado como resultado principal, ya que esta materia y nivel educativo ofrecen información crítica sobre la educación fundamental.

Este estudio se centra en tres variables de contexto docente: experiencia docente (BTBG01), énfasis escolar en el éxito académico (BTBGEAS), y limitaciones de la enseñanza debido a las necesidades de los estudiantes (BTBGLSN). Estas variables permiten un análisis detallado tanto de los efectos individuales de los profesores como de los contextuales de la escuela en los resultados estudiantiles dentro de cada país.

El modelo es un HLM de dos niveles, donde el primer nivel representa el logro matemático individual de los estudiantes y el segundo nivel captura las variables a nivel de profesor y escuela. En lugar de incorporar el país como un tercer nivel en un modelo unificado, se calcularon modelos separados para cada país. El análisis inicial del efecto de los años de experiencia docente se realizó usando los 22 países; con base en ese análisis inicial, se seleccionaron ocho países con resultados significativos en cuanto a años de experiencia docente para una investigación más profunda. Modelos posteriores incorporaron énfasis escolar en el éxito académico (BTBGEAS) y limitaciones en la enseñanza debido a las necesidades de los estudiantes (BTBGLSN), con el fin de explorar en qué medida estas variables a nivel de profesor podrían atenuar el efecto de la experiencia docente en el rendimiento estudiantil en esos ocho países específicos. Finalmente, este análisis proporciona información sobre variaciones entre países respecto a cómo las características docentes pueden influir en el logro estudiantil.



Implementación del modelo

El HLM es una técnica estadística que puede analizar estructuras de datos jerárquicamente anidadas, como estudiantes anidados dentro de profesores. En este estudio, los datos están organizados jerárquicamente, con los estudiantes en el Nivel 1 y los profesores en el Nivel 2. El uso de HLM permite modelar dependencias dentro de grupos y evaluar cómo los predictores de Nivel 2 influyen en los resultados de Nivel 1. Los modelos de efectos mixtos, que forman la base del HLM, consideran tanto efectos fijos como aleatorios, lo que los hace ideales para estructuras de datos anidadas y asegura una estimación precisa de las relaciones entre predictores y resultados (Bliese, 2016; Raudenbush & Bryk, 2002).

El modelo de dos niveles

El modelo final de dos niveles utilizado en este estudio (Modelo 3) es el siguiente:

Nivel 1 (Modelo a nivel de estudiante):

$$Y_{ij} = \beta_{0j} + r_{ij}$$

Donde:

Y_{ij} : puntaje de logro en matemáticas del estudiante i en el aula del profesor j .

β_{0j} : intercepto que representa el puntaje promedio en matemáticas del aula del profesor j .

r_{ij} : error aleatorio del estudiante i dentro del aula del profesor j .

Nivel 2 (Modelo a nivel de profesor):

$$\beta_{0j} = \gamma_{00} + \gamma_{01}(\text{Experiencia Docente}) + \gamma_{02}(\text{Énfasis escolar en el éxito académico}) \\ + \gamma_{03}(\text{Limitaciones de enseñanza}) + u_{0j}$$

Donde:

γ_{00} : promedio general de los puntajes de matemáticas en todos los profesores.

γ_{01} , γ_{02} , and γ_{03} : efectos fijos de la experiencia docente (BTBG01), del énfasis escolar en el éxito académico (BTBGEAS) y de las limitaciones percibidas en la enseñanza debido a las necesidades de los estudiantes (BTBGLSN), respectivamente.

u_{0j} : efecto aleatorio para el profesor j , que captura la variabilidad entre profesores.

El modelo propuesto expande el modelo nulo (solo intercepto) al incluir predictores como años de experiencia docente, énfasis escolar en el éxito académico y limitaciones de enseñanza debido a las necesidades estudiantiles. Este modelo permite una comprensión más matizada de cómo los predictores a nivel de profesor influyen en la variable de resultado basada en el logro estudiantil.

Proceso de análisis

El análisis se realizó en **R**, aplicando el paquete *lme4* para modelado de efectos mixtos. El proceso de modelado comenzó ajustando modelos con la función *lmer*, que permite una estimación eficiente de efectos fijos y aleatorios (Bliese, 2016). Se calcularon los coeficientes



de correlación intraclase (ICC) para evaluar la estructura de los datos y confirmar la pertinencia del uso del HLM. Además, se generaron algunos gráficos diagnósticos para evaluar supuestos clave, incluyendo la normalidad de los residuos y la distribución de los efectos aleatorios, asegurando la robustez del modelo (Raudenbush & Bryk, 2002).

La descomposición de la varianza ayudó a determinar cuánta variabilidad en el resultado (logro matemático) podía atribuirse a diferencias entre grupos (profesores). Un ICC sustancial indica un efecto significativo de grupo, lo cual respalda el uso de un modelo de efectos mixtos en lugar de métodos más simples como MCO, ya que evidencia que la varianza debida a estructuras de agrupamiento es más que azar.

Antes de evaluar la efectividad del HLM, este estudio aplicó un ANOVA de un factor con efectos aleatorios como paso inicial. Este enfoque permitió dividir la varianza del logro estudiantil en dos componentes: varianza dentro de grupo (variación entre estudiantes con el mismo profesor) y varianza entre grupos (variación entre profesores). Este método determina si una proporción significativa de la varianza en el logro estudiantil puede atribuirse a diferencias entre profesores (ver Tabla 1).

La ecuación usada para el Modelo 0 es:

$$Y_{ij} = \gamma_{00} + u_{0j} + r_{ij}$$

Donde:

Y_{ij} representa el puntaje en matemáticas del estudiante i con el profesor j .

γ_{00} promedio general de logro.

u_{0j} efectos aleatorios entre grupos (profesores).

r_{ij} residuos dentro de los grupos.

Este modelo es un modelo incondicional (nulo) sin predictores, que calcula la proporción de varianza total atribuida a diferencias a nivel profesor a través del ICC.

El ICC se calcula como:

$$ICC = \frac{\tau^2}{\tau^2 + \sigma^2}$$

donde τ^2 es la varianza entre grupos y σ^2 la varianza dentro de grupos.

El cálculo del ICC permite determinar la proporción de varianza en el logro en matemáticas atribuible a diferencias entre profesores. Esta correlación cuantifica el grado de agrupamiento dentro de los datos, subrayando la medida en que los resultados de los estudiantes están influenciados por el contexto de su profesor. Un ICC sustancial indica un efecto grupal significativo, respaldando el uso de un modelo de efectos mixtos en lugar de métodos más simples de mínimos cuadrados ordinarios (OLS), ya que indica que la varianza debida a estructuras de agrupamiento es más que el azar. Así, el modelo incondicional estima cuánta variación en las puntuaciones de logro en matemáticas de los estudiantes resulta de los efectos a nivel de profesor (Raudenbush & Bryk, 2002).



Esta medida es crítica para confirmar la estructura jerárquica de los datos y justificar el uso de HLM. Un ICC superior a 0.10 sugiere una variación considerable a nivel de profesor, lo cual permite la aplicación de un modelo multinivel para dar cuenta de las dependencias dentro de los grupos (Bliese, 1998; Bliese, 2016). Este paso de calcular el ICC asegura que la aplicación de HLM sea apropiada para el estudio y proporciona una visión sobre la distribución de la varianza entre niveles. Un ICC alto indica diferencias significativas entre profesores, apoyando la aplicación del modelado jerárquico para estimar los efectos de los predictores a nivel de profesor (Raudenbush & Bryk, 2002).

Después de aplicar el ICC, construimos el modelo HLM para refinar el análisis. El modelo sin predictores, conocido como “modelo nulo”, proporciona un punto de referencia para evaluar el poder explicativo de los modelos posteriores (Raudenbush & Bryk, 2002). A continuación, se agregó la variable de experiencia docente como único predictor a nivel de profesor para evaluar su efecto en el logro en matemáticas de los estudiantes. El modelo de un predictor muestra la relación entre los años de experiencia docente (BTBG01) y el logro en matemáticas de los estudiantes (BSMMAT01). Este modelo estima el cambio promedio en las puntuaciones de los estudiantes por cada año adicional de experiencia docente mientras se verifica la variabilidad entre profesores y entre estudiantes. Este modelo (Modelo 1) puede escribirse como:

$$Y_{ij} = \gamma_{00} + \gamma_{01}(\text{Experiencia Docente}) + u_{0j} + r_{ij}$$

donde γ_{01} es el efecto fijo de los años de experiencia docente. Este coeficiente representa el cambio en las puntuaciones de matemáticas de los estudiantes por cada año adicional de experiencia docente.

En el paso final, una por una, se incluyen secuencialmente variables adicionales de contexto docente, incluyendo énfasis escolar en el éxito académico (BTBGEAS) y enseñanza limitada por las necesidades de los estudiantes (BTBGLSN). Esto permite evaluar tanto sus contribuciones individuales como sus efectos combinados en los resultados de los estudiantes, permitiendo una mejor comprensión de las influencias a nivel de profesor en el logro en matemáticas. El modelo de dos predictores analiza los efectos de la experiencia docente (BTBG01) y el énfasis escolar en el éxito académico (BTBGEAS) sobre el logro en matemáticas de los estudiantes (BSMMAT01). Este modelo calcula las contribuciones individuales de cada predictor mientras verifica la variabilidad entre profesores.

El segundo modelo (Modelo 2) puede escribirse como:

$$Y_{ij} = \gamma_{00} + \gamma_{01}(\text{Experiencia Docente}) + \gamma_{02}(\text{Énfasis escolar en el éxito académico}) + u_{0j} + r_{ij}.$$



Este modelo añade γ_{02} como el efecto fijo del énfasis escolar en el éxito académico, indicando el cambio en las puntuaciones de los estudiantes por un incremento de una desviación estándar en BTBGEAS (variable estandarizada). Esta variable fue estandarizada para asegurar la interpretabilidad de los coeficientes. Estandarizar significa transformar las variables a una media de 0 y una desviación estándar de 1, lo cual permite una escala consistente de los predictores. Este proceso simplifica la interpretación de los coeficientes al presentarlos en términos de desviaciones estándar, facilitando las comparaciones entre predictores con unidades o magnitudes diferentes. Además, la estandarización es beneficiosa en el modelado multinivel cuando los predictores tienen escalas de medición diversas, ya que ayuda a comprender su importancia y contribución al modelo (Bliese, 2016).

Las ecuaciones para el modelo de tres predictores (Modelo 3) se presentaron anteriormente. Este modelo sigue las mismas convenciones que el modelo anterior, incluyendo la estandarización de la variable enseñanza limitada por las necesidades de los estudiantes (BTBGLSN). Es importante señalar que esta variable debe interpretarse de manera que un valor más alto sugiera menos limitaciones percibidas por el profesor en su enseñanza debido a las necesidades de los estudiantes. La multicolinealidad del modelo final fue verificada para confirmar que las variables predictoras no estuvieran excesivamente correlacionadas. Un alta multicolinealidad puede afectar los coeficientes de regresión y la fiabilidad de las estimaciones. Se calcularon los Factores de Inflación de la Varianza (VIF) para cada predictor, con todos los valores por debajo del umbral comúnmente aceptado de 10, eliminando cualquier preocupación sobre la multicolinealidad en el análisis (Bliese, 2016). Al verificar la independencia de los predictores, este paso añadió robustez a los hallazgos y aseguró la estabilidad de los resultados.

RESULTADOS

La Tabla 1 contiene los Coeficientes de Correlación Intraclass (ICC) de los modelos incondicionales de logro en matemáticas de octavo grado para los 22 países que participaron en e-TIMSS 2019.

Tabla 1

(Modelo 0): Coeficientes de Correlación Intraclass (ICC) para 22 países del Modelo Incondicional (TIMSS 2019, Matemáticas Grado 8)

País	ICC	País	ICC
------	-----	------	-----



Chile	0.46	Lituania	0.32
China Taipei	0.38	Malasia	0.60
Inglaterra	0.47	Noruega	0.11
Finlandia	0.35	Portugal	0.31
Francia	0.27	Qatar	0.47
Georgia	0.37	Rusia	0.42
Hong Kong SAR	0.62	Singapur	0.75
Hungría	0.49	Suecia	0.24
Israel	0.63	Turqía	0.34
Italia	0.21	Emiratos Árabe U.	0.59
Corea (República de)	0.18	Estados Unidos	0.62

El ICC para los 22 países varió entre 0.11 y 0.75, con Noruega como el más bajo y Singapur como el más alto, lo que indica diferentes niveles de varianza entre grupos. Cabe destacar que todos los valores fueron superiores al umbral requerido de 0.10, lo que confirma que el Modelo Jerárquico Lineal (HLM) es apropiado para analizar los datos. Estos valores de ICC subrayan la presencia de efectos de agrupamiento significativos a nivel del profesor, justificando el uso del análisis HLM.

Los países con valores de ICC más altos, como Singapur (0.75), Hong Kong SAR (0.62), Israel (0.63), Estados Unidos (0.62), Malasia (0.60) y Emiratos Árabes Unidos (0.59), muestran que una proporción sustancial de la varianza en el rendimiento estudiantil puede atribuirse a diferencias entre profesores. Asimismo, países con valores moderados de ICC como Inglaterra (0.47), Hungría (0.49), Catar (0.47), Chile (0.46) y la Federación Rusa (0.42) indican que tanto los factores a nivel de profesor como los de estudiante contribuyen al rendimiento estudiantil. El profesor que un estudiante tenga y la escuela a la que asista todavía juegan un papel importante en estos países, pero las características individuales también tienen efectos significativos. En contraste, países con valores relativamente bajos de ICC, como Francia (0.27), Suecia (0.24), Italia (0.21), República de Corea (0.18) y Noruega (0.12), sugieren que la mayor parte de la variación en el logro estudiantil se debe a factores dentro de los salones de clase, como el trasfondo del estudiante o la dinámica del aula, más que a diferencias a nivel de profesor. En otras palabras, si seleccionamos salones aleatorios en un país con un ICC bajo, tenderían a tener distribuciones de logro similares. Sin embargo, en países con un ICC alto, las distribuciones probablemente serían muy diferentes entre aulas. La Tabla 2 muestra los resultados del modelo jerárquico lineal que incorpora los efectos de los años de experiencia docente en el rendimiento en matemáticas de los estudiantes de octavo grado en 22 países.

Tabla 2



(Modelo 1): Resultados del Modelo Jerárquico Lineal con Experiencia Docente como Predictor en 22 Países (TIMSS 2019, Matemáticas Grado 8)

País	Intercepción	Coef. Años de Exp. Docente	País	Intercepción	Coef. Años de Exp. Docente
Chile	443.22	0.28	Lituania	507.63	0.04
China Taipei	550.88	1.91***	Malasia	501.34	-0.84
Inglaterra	498.38	1.38	Noruega	506.63	-0.02
Finlandia	496.00	0.004	Portugal	491.57	0.36
Francia	483.18	0.09	Qatar	470.89	-1.48**
Georgia	485.45	-0.88*	Rusia	541.40	0.06
Hong Kong SAR	584.17	-0.67	Singapur	597.74	0.77
Hungría	537.13	-0.58	Suecia	508.00	-0.16
Israel	477.85	1.44***	Turquía	454.58	3.40***
	487.24	0.48*	Emiratos A. U.	500.99	-2.01***
Italia			Estados Unidos	499.94	1.07*
Rep. de Corea	596.36	0.14			

Nota: * representa un efecto estadísticamente significativo en $p < .05$, ** en $p < .01$, y *** en $p < .001$. La ausencia de * indica que el efecto no fue significativo en $p < .05$.

En este modelo, los interceptos representan los puntajes promedio estimados en matemáticas para cada país, mientras que el coeficiente de años de experiencia docente refleja el cambio esperado en los puntajes de los estudiantes por cada año adicional de experiencia del profesor. Por ejemplo, en Taipéi Chino, el intercepto es 550.88 y el coeficiente de experiencia docente es 1.91. Este coeficiente fue estadísticamente significativo ($p < .001$), lo que indica una relación positiva fuerte y significativa entre los años de experiencia docente y el rendimiento estudiantil. Específicamente, por cada año de experiencia que tiene un profesor, se espera que el puntaje promedio de un estudiante en esa aula sea 1.91 puntos más alto que el promedio general (intercepto). En contraste, Malasia tiene un intercepto de 501.34, pero el coeficiente de experiencia docente es -0.84. Este coeficiente no fue estadísticamente significativo (0.12), lo que significa que no hay evidencia suficiente para rechazar la hipótesis nula de que el coeficiente es igual a 0, sugiriendo que los años de experiencia no tienen un impacto significativo en el rendimiento estudiantil.

Los países como Taipéi Chino, Turquía e Israel muestran efectos positivos fuertes de la experiencia docente en el rendimiento estudiantil. Por ejemplo, en Turquía, el intercepto es 454.58 y el coeficiente de experiencia docente es 3.396 ($p < .001$), lo que indica un impacto positivo altamente significativo. De forma similar, Israel tiene un intercepto de 477.85 y un



coeficiente de 1.44, nuevamente señalando una relación significativa. Estos resultados sugieren que, en estos países, los docentes más experimentados tienden a tener estudiantes con puntajes promedio más altos que aquellos con menos experiencia.

Por otro lado, algunos países como Georgia y los Emiratos Árabes Unidos muestran efectos negativos significativos de los años de experiencia docente sobre el rendimiento. En Georgia, el coeficiente es -0.88 ($p < .05$), y en los EAU es -2.01 ($p < .001$). Estos coeficientes negativos podrían indicar que, en algunos contextos, los profesores con más años de experiencia están asociados con un rendimiento ligeramente menor en matemáticas.

En conclusión, los resultados de este análisis HLM destacan variaciones significativas en el impacto de la experiencia docente en el rendimiento en matemáticas según el país. Mientras que en países como Turquía e Israel se observa una relación positiva fuerte, en otros como Georgia y los EAU se observan efectos negativos. Esto sugiere que la efectividad de la experiencia docente puede estar influenciada por factores contextuales.

Factores Contextuales Adicionales

En este punto, el análisis se centra en los ocho países con resultados significativos del modelo inicial, donde el coeficiente de los años de experiencia docente tuvo un impacto relevante en el rendimiento en matemáticas de los estudiantes. Este enfoque nos permitió estudiar más a fondo la interacción de los factores a nivel docente en el rendimiento de los estudiantes.

Una práctica común en el modelado jerárquico es delimitar el análisis para enfocarse en las variables más relevantes y maximizar el poder explicativo del modelo mientras se abordan preguntas específicas de investigación (Raudenbush & Bryk, 2002). Al concentrarse en estos ocho países, este estudio ofrece una exploración detallada de la relación entre los años de experiencia docente, el énfasis escolar en el éxito académico, las limitaciones percibidas en la enseñanza debido a las necesidades de los estudiantes y los resultados de los estudiantes, así como identificar patrones o variaciones consistentes.

El análisis en la Tabla 3 muestra un Modelo Jerárquico Lineal para examinar los efectos de la experiencia docente y el énfasis escolar en el éxito académico sobre el rendimiento en matemáticas de los estudiantes en ocho países seleccionados utilizando los datos de TIMSS 2019 de octavo grado. Debido a que el énfasis escolar en el éxito académico fue estandarizado, el intercepto en este modelo refleja la puntuación promedio en matemáticas de un estudiante en un aula con un docente con 0 años de experiencia docente en una escuela con un nivel promedio de énfasis en el éxito académico.

Tabla 3

(Modelo 2): Países seleccionados que muestran efectos significativos de la Experiencia Docente (BTBG01) y del Énfasis Escolar en el Éxito Académico estandarizado (BTBGEAS) sobre el Rendimiento en Matemáticas (TIMSS 2019, Octavo Grado)



País	Intercepto	Coef. Años de Experiencia Docente	Coef. Énfasis Escolar en Éxito Académico
China Taipei	555.32	1.65***	29.63 ***
Georgia	484.66	-0.84*	12.66 **
Israel	476.39	1.55***	20.86 ***
Italia	488.38	0.42	8.27 **
Qatar	467.39	-1.21*	19.94 ***
Turquía	459.80	2.88***	17.38 ***
Emiratos Árabe Unido	499.74	-1.91***	14.03 ***
Estados Unidos	502.02	0.91*	12.35 ***

Nota: * representa un efecto estadísticamente significativo en $p < .05$, ** en $p < .01$, y *** en $p < .001$. La ausencia de * indica que el efecto no fue estadísticamente significativo en $p < .05$.

El Modelo 2 introduce la variable estandarizada “Énfasis Escolar en el Éxito Académico” para predecir el rendimiento en matemáticas en los países seleccionados. Se observa que, en comparación con el Modelo 1, el Modelo 2 demuestra un mayor poder explicativo al añadir el énfasis escolar en el éxito académico a nivel institucional. Esto se respalda con una comparación ANOVA, donde el Modelo 2 mostró una reducción significativa en la desviación en todos los países analizados, con valores de Chi-cuadrado que indican consistentemente $p < 0.001$, lo que confirma la contribución sustancial de la variable añadida para explicar la varianza en el rendimiento en matemáticas de los estudiantes. La inclusión de esta variable resalta su papel fundamental en la influencia de los resultados, ya que mostró efectos positivos y significativos de manera consistente en los distintos países. Este hallazgo subraya la importancia de fomentar una sólida cultura académica, incluso en contextos donde la experiencia docente por sí sola tiene efectos limitados o negativos, como en países como Georgia y Emiratos Árabes Unidos.

Los resultados del Modelo 2 revelan que el Énfasis Escolar en el Éxito Académico tiene un impacto positivo y significativo de manera consistente sobre el rendimiento de los estudiantes en todos los países incluidos en este modelo. Sin embargo, los tamaños de los coeficientes varían: Taipéi Chino presentó el valor más alto (29.63) e Italia el más bajo (8.27). Taipéi Chino exhibió el mayor coeficiente para BTBGEAS, seguido por Israel (20.86) y Catar (19.94), lo que resalta la fuerte influencia de un enfoque académico sólido. De manera similar, Turquía (17.38) y Emiratos Árabes Unidos (14.03) también mostraron contribuciones significativas de BTBGEAS en el rendimiento estudiantil. En Estados Unidos, BTBGEAS tuvo un coeficiente de 12.35, lo que enfatiza el papel de esta variable incluso en sistemas educativos diversos. Aunque Italia tuvo el coeficiente más pequeño, los



hallazgos en conjunto subrayan la relevancia universal del énfasis en el éxito académico y su papel crítico en la mejora del rendimiento en matemáticas en todos los países.

Es importante destacar que los coeficientes para los Años de Experiencia Docente (BTBG01) se atenuaron (se acercaron a 0) en el Modelo 2 para todos los países excepto Israel. Esto indica que el énfasis escolar en el éxito académico influye en los efectos directos de los años de experiencia docente sobre el rendimiento estudiantil, al reducir la influencia independiente de BTBG01. Por ejemplo, aunque Taipéi Chino y Turquía aún mostraron efectos positivos y significativos de la experiencia docente, sus coeficientes disminuyeron en comparación con el Modelo 1. Los resultados del Modelo 2 muestran que el énfasis escolar en el éxito académico tiene un impacto positivo y significativo de manera consistente en todos los países de este modelo, aunque los tamaños de los coeficientes varían, siendo mayor en Taipéi Chino (29.63) y menor en Italia (8.27).

Además, la inclusión de la variable de énfasis escolar provocó que el coeficiente de los años de experiencia docente en Italia pasara de ser significativo en el Modelo 1 a no significativo en el Modelo 2. Esto resalta el papel crucial del entorno académico de la escuela en el apoyo al rendimiento estudiantil. Estos hallazgos apuntan a la importancia más amplia de crear entornos académicos sólidos que no solo potencien el rendimiento de los estudiantes, sino que también amplifiquen o mitiguen los efectos de otras variables a nivel docente, como la experiencia.

Asimismo, en países como Taipéi Chino, Israel y Turquía, ambas variables muestran efectos sólidos y estadísticamente significativos en el rendimiento matemático, lo que sugiere que la inclusión de BTBGEAS mejora la capacidad del modelo para capturar factores contextuales a nivel docente. En el caso de Taipéi Chino, el coeficiente para BTBG01 disminuyó ligeramente (de 1.91 a 1.65) con la inclusión de BTBGEAS, que obtuvo un coeficiente de 29.63, pero ambas variables resultaron altamente significativas, lo que resalta el papel crítico de un fuerte énfasis escolar en lo académico a nivel docente. En contraste, Israel mostró una mejoría en el coeficiente de BTBG01 (de 1.44 a 1.55) y un

valor de BTBGEAS de 20.86, lo que indica que la inclusión de este factor en el modelo también influye en los efectos de los años de experiencia docente. De manera similar, la mejora es evidente en Catar y Emiratos Árabes Unidos, donde la experiencia docente sigue estando negativamente asociada al rendimiento, pero la adición de BTBGEAS contribuye a un impacto positivo y significativo en estos países. Esto refleja la valiosa contribución de incluir la variable BTBGEAS. Más allá de mejorar el poder explicativo del modelo, su inclusión subraya su importancia para comprender los efectos combinados de la experiencia docente y el énfasis escolar en el rendimiento en matemáticas de los estudiantes.



En resumen, los hallazgos del HLM utilizado en el Modelo 2 muestran que, aunque la experiencia docente tiene efectos mixtos según el país, el énfasis en el éxito académico parece influir positivamente en el rendimiento en matemáticas en los ocho países analizados en este estudio.

Tabla 4

(Modelo 3): Modelo Lineal Jerárquico con Factores Contextuales Adicionales que Influyen en el Rendimiento Estudiantil a Nivel Docente (TIMSS 2019, Logro en Matemáticas, 8° grado)

País	Intercepto	Coef. Años de Experiencia Docente	Coef. Énfasis Ecolar en el éxito Académico	Coef. Limitaciones debidas a las Necesidades de los Estudiantes
China Taipei	554.38	1.65***	24.59 ***	18.20 ***
Georgia	481.12	-0.73	13.42 **	-1.08
Israel	477.78	1.48***	13.95 ***	27.25 ***
Italia	487.79	0.45	7.11 **	4.84
Qatar	470.21	-1.43**	14.49 **	18.03 ***
Turquía	462.31	2.63***	11.44 *	19.49 ***
Emiratos Arabe Unid.	497.33	-1.68***	10.13 ***	12.69 ***
Estados Unidos	503.40	0.80	11.57 ***	7.66 ***

Nota: * representa un efecto estadísticamente significativo en $p < .05$, ** en $p < .01$ y *** en $p < .001$. La ausencia de * indica que el efecto no fue estadísticamente significativo en $p < .05$.

El Modelo 3 resalta una gran diferencia en los efectos de la experiencia docente (BTBG01) entre países. Sin embargo, en comparación con el Modelo 2, el número de resultados significativos de esta variable disminuye de seis a cinco de ocho países, atenuando aún más el impacto de los años de experiencia docente. El énfasis estandarizado en el éxito académico (BTBGEAS) muestra un impacto positivo y significativo frecuente en la mayoría de los países. En contraste, las limitaciones en la enseñanza debido a las necesidades de los estudiantes (BTBGLSN) también son significativas en muchos países, con los efectos más fuertes en Israel (27.25) y Turquía (19.49). Estos resultados sugieren que las limitaciones debidas a las necesidades de los estudiantes pueden mejorar sustancialmente el rendimiento en matemáticas. Sin embargo, el efecto no es estadísticamente significativo en Georgia (-1.08) e Italia (4.84), lo que indica que este factor no influye de manera uniforme en el rendimiento estudiantil entre países. De hecho, para Italia y Georgia, la inclusión de este factor no muestra efectos significativos. Los coeficientes para BTBGLSN y BTBG01 no son significativos en ambos países, lo que indica que estas variables no contribuyen al rendimiento en matemáticas. El coeficiente de BTBGEAS se mantiene significativo, pero su



valor disminuye del Modelo 2 al Modelo 3. Esto sugiere que el Modelo 3 no es necesario para Italia y Georgia, ya que no aporta mejoras sustanciales en el ajuste del modelo ni en la interpretabilidad.

Para estos dos países, las estadísticas de comparación de modelos respaldan esta afirmación, dado que la inclusión de BTBGLSN en el Modelo 3 no logra proporcionar mejoras significativas en el poder explicativo. Por ejemplo, una comparación ANOVA entre el Modelo 2 y el Modelo 3 demostró una reducción significativa en la desviación, confirmando que la adición de BTBGLSN mejoró sustancialmente el poder explicativo del modelo. Sin embargo, para países como Italia y Georgia, la variable adicional (BTBGLSN) no produjo beneficios sustanciales, como se refleja en los coeficientes no significativos. Siguiendo el principio de parsimonia, es más prudente aceptar el Modelo 2 sobre el Modelo 3 en estos contextos, priorizando la simplicidad y la interpretabilidad sin sacrificar el poder explicativo.

Además, existen algunas diferencias en la significancia y en el valor de los predictores entre los Modelos 2 y 3 en los países seleccionados. En el Modelo 3, la inclusión adicional de Limitaciones en la Enseñanza por Necesidades de los Estudiantes introduce otra complejidad, y su impacto varía según el país. Por ejemplo, en Taipéi Chino, Israel, Catar, Turquía y Emiratos Árabes Unidos, el coeficiente de BTBGLSN es estadísticamente significativo, lo que sugiere que contribuye sustancialmente a explicar el rendimiento matemático de los estudiantes. Esto indica que el modelo ha mejorado para estos países, porque BTBGLSN pudo capturar aspectos adicionales a nivel docente que influyen en los resultados estudiantiles y que no fueron capturados en el Modelo 2.

El Modelo 3 revela que, mientras el efecto de los años de experiencia docente no es uniforme entre países, el énfasis en el éxito académico y la minimización de limitaciones en la enseñanza debidas a las necesidades de los estudiantes son factores críticos para promover el rendimiento estudiantil en matemáticas en la mayoría de los países.

En general, el Modelo 3 mejora sobre el Modelo 2 en los países donde BTBGLSN es un predictor significativo, como Taipéi Chino, Israel, Catar, Turquía, Emiratos Árabes Unidos y Estados Unidos. Estos hallazgos subrayan la importancia de considerar factores contextuales específicos, como las limitaciones en la enseñanza por necesidades de los estudiantes. Por ejemplo, en Estados Unidos, con un coeficiente positivo y significativo de 7.66 para BTBGLSN, se destaca la contribución relevante de abordar estas limitaciones para mejorar el rendimiento estudiantil. De manera similar, en países como Taipéi Chino (18.20), Israel (27.25) y Turquía (19.49), BTBGLSN captura aspectos críticos del contexto docente que influyen en los resultados estudiantiles. Sin embargo, para Italia y Georgia, el Modelo 2 podría ser más efectivo, ya que BTBGLSN no mejora significativamente el rendimiento



matemático de los estudiantes. Este resultado entre países subraya la necesidad de crear modelos que se ajusten a los contextos educativos de cada región.

DISCUSIÓN

Este estudio proporciona importantes perspectivas sobre los efectos de la experiencia docente y las variables del contexto de enseñanza en el rendimiento en matemáticas de los estudiantes de octavo grado en los países participantes de e-TIMSS 2019. Mediante la aplicación de HLM, esta investigación analiza cómo los años de experiencia docente, el énfasis escolar en el éxito académico y las limitaciones percibidas en la enseñanza debido a las necesidades de los estudiantes influyen en los resultados de los alumnos.

De acuerdo con los resultados, el efecto de los años de experiencia docente en el rendimiento matemático de los estudiantes presenta una variación significativa entre los países, lo que desafía la uniformidad sugerida en estudios previos. Países como Taipéi Chino, Turquía e Israel muestran asociaciones fuertemente positivas, pero en Georgia y los Emiratos Árabes Unidos el estudio encuentra efectos negativos o no significativos. La variabilidad de esta variable a lo largo de los modelos podría sugerir que factores contextuales, como las diferencias en los sistemas educativos (énfasis en el éxito académico) o la asignación de recursos (necesidades de los estudiantes), pueden influir en el impacto de la experiencia docente. Lindström et al. (2024) subrayan una relación positiva entre la experiencia docente y los resultados de los estudiantes. De manera similar, Toropova et al. (2019) proponen una relación curvilínea, donde el rendimiento alcanza su punto máximo después de 19 años de experiencia y luego declina. Sin embargo, los hallazgos de este proyecto revelan que esta relación no es globalmente consistente. Por ejemplo, en el

Modelo 1, los efectos de la experiencia docente fueron estadísticamente significativos solo en ocho países, lo que impulsa a examinar factores contextuales adicionales que puedan influir en esta relación. Esto enfatiza la variabilidad de cómo la experiencia docente impacta en el rendimiento estudiantil en diferentes países.

En general, los hallazgos tienen implicaciones significativas para los responsables de políticas, los docentes y las escuelas. En efecto, los maestros con experiencia podrían tener estrategias adaptativas o habilidades pedagógicas que resulten especialmente efectivas para el aprendizaje de los estudiantes, particularmente en matemáticas. Sin embargo, hubo variación en el ICC, que indica la proporción de varianza en el rendimiento en matemáticas atribuible a diferencias entre docentes, en 22 países. Un ICC alto en países como Estados Unidos y Singapur indica que los factores a nivel docente juegan un papel importante en los resultados de los estudiantes. Esto coincide con hallazgos en la literatura, como los de Blömeke y Delaney (2012), quienes mencionaron la importancia de los maestros experimentados para mejorar el rendimiento estudiantil como un factor. No obstante, un ICC



bajo en países como Corea y Noruega señala que los factores a nivel del estudiante pueden tener una mayor influencia, destacando que podría ser necesario aplicar diversos factores instruccionales y contextuales para optimizar los entornos de aprendizaje (Aru & Kale, 2019).

Por el contrario, en países como Emiratos Árabes Unidos y Qatar, la relación negativa entre experiencia docente y rendimiento estudiantil plantea preguntas sobre factores contextuales que pueden influir en esta relación. Este hallazgo coincide con Aru y Kale (2019), quienes mencionaron que es necesario contar con un apoyo institucional adecuado para permitir que los docentes atiendan de manera efectiva las diversas necesidades de los estudiantes. En estos países, podría ocurrir que los maestros más experimentados carezcan de acceso a desarrollo profesional o enfrenten barreras estructurales que afecten su efectividad en la enseñanza, lo que puede explicar las discrepancias en estos resultados. Factores como el acceso a formación continua y sistemas de apoyo institucional podrían influir significativamente en la relación entre experiencia docente y rendimiento matemático de los estudiantes en diferentes países.

La incorporación de la variable énfasis escolar en el éxito académico (BTBGEAS) mejoró significativamente el modelo en todos los países analizados. Esta variable mostró de manera consistente un impacto positivo y significativo en el rendimiento en matemáticas de los estudiantes, subrayando la importancia de un enfoque académico a nivel institucional. Por ejemplo, en el Modelo 2, la adición de BTBGEAS impacta positivamente en todos los países seleccionados, incluso cuando los efectos de la experiencia docente variaban. Países como Taipéi Chino e Israel exhibieron coeficientes altos para BTBGEAS, lo que indica que la importancia de metas académicas sólidas podría amplificar los efectos positivos de la

experiencia docente. Estos hallazgos se alinean con Goddard et al. (2000), quienes enfatizaron el papel de la eficacia colectiva de los docentes en la promoción de altos estándares académicos. Sin embargo, los resultados amplían este entendimiento al demostrar que incluso en contextos donde la experiencia docente muestra un efecto negativo o no significativo (Georgia y Emiratos Árabes Unidos en los Modelos 1 y 2), un fuerte énfasis en el éxito académico puede mitigar estos resultados.

Por otro lado, cuando se agrega la variable limitaciones en la enseñanza debido a las necesidades de los estudiantes (BTBGLSN) como predictor en el modelo, esto indica una nueva comprensión de los efectos a nivel docente en el rendimiento estudiantil. Los resultados muestran que este factor tiene un impacto sustancial y positivo en países como Taipéi Chino, Israel y Turquía, pero no es significativo en otros como Italia y Georgia.

Por ejemplo, los efectos fuertes y estadísticamente significativos de BTBGLSN en Israel y Turquía subrayan la importancia de atender las necesidades de los estudiantes para maximizar la efectividad de las prácticas docentes. Sin embargo, BTBGEAS demostró



efectos positivos significativos en la mayoría de los países en el Modelo 3, pero disminuyó en comparación con el Modelo 2, lo que refleja la influencia de gestionar las limitaciones en el aula. Estos hallazgos revelan que BTBGEAS sigue siendo un impulsor crítico del éxito estudiantil, pero es necesario considerar otros factores contextuales, como las necesidades de los alumnos. Además, esto sugiere que atender las necesidades estudiantiles puede mejorar la efectividad docente y el rendimiento, particularmente en contextos educativos diversos. Martin et al. (2020) identificaron diversas limitaciones que reducen la efectividad docente, incluidas la preparación de los estudiantes y la diversidad en el aula. Asimismo, Lindström et al. (2024) sostienen que los maestros experimentados desarrollan estrategias adaptativas, mostrando que dichas estrategias son más efectivas cuando se refuerzan con apoyo institucional para atender las necesidades de los alumnos. Los hallazgos de este proyecto destacan estas observaciones y demuestran que superar estas limitaciones es crucial para mejorar los resultados de los estudiantes. Cabe destacar que la inclusión de BTBGLSN en el Modelo 3 muestra una mejora significativa en países donde las necesidades de los estudiantes son críticas para la efectividad instruccional en comparación con el Modelo 1, como Qatar y Emiratos Árabes Unidos. En estos contextos, BTBGLSN contribuye positivamente y refuerza la importancia de equilibrar el apoyo institucional con las prácticas docentes para enfrentar los retos de las necesidades estudiantiles.

El análisis de la experiencia docente, el énfasis escolar en el éxito académico y las limitaciones en la enseñanza debido a las necesidades de los estudiantes proporciona una aclaración de las influencias a nivel docente en el rendimiento en matemáticas. Mientras que estudios previos a menudo examinaron estos factores de manera independiente (p. ej.,

Blömeke et al., 2016; Şahin & Öztürk, 2018), los resultados de este proyecto muestran que su interacción puede revelar perspectivas más profundas. Por ejemplo, en países como Qatar y Emiratos Árabes Unidos, donde la experiencia docente tiene un impacto negativo,

la inclusión de BTBGEAS y BTBGLSN resalta su potencial para equilibrar o incluso compensar estos efectos. Esta perspectiva integradora resalta la importancia de considerar una variedad de factores contextuales.

En general, la progresión del Modelo 2 al Modelo 3 demuestra los importantes efectos de combinar factores a nivel docente. BTBGEAS muestra efectos significativos en varios países, pero agregar BTBGLSN en el Modelo 3 refuerza sus efectos en algunos países. Sin embargo, para contextos como Italia y Georgia, donde BTBGLSN no es significativo, la estructura del Modelo 2 parece ser más efectiva. Estos hallazgos demuestran la importancia de alinear los modelos a contextos educativos específicos, avanzando en la comprensión de cómo los factores institucionales y los desafíos a nivel docente influyen en el rendimiento estudiantil.



En general, los hallazgos sugieren importantes implicaciones para la política y la práctica. Los responsables de políticas deben considerar la provisión de recursos que puedan apoyar el desarrollo docente, principalmente en países donde la experiencia docente no tiene buenas implicaciones en el rendimiento estudiantil. De hecho, las inversiones en mejorar el desarrollo profesional y proporcionar capacitación docente podrían ayudar a evitar desafíos contextuales y lograr efectividad instruccional, especialmente en países con efectos negativos o no significativos de la experiencia docente (Akyüz Aru & Kale, 2019). Para los docentes, los hallazgos enfatizan la creación de un fuerte énfasis en el éxito académico en la escuela a nivel docente. De este modo, las escuelas deberían priorizar la promoción de entornos colaborativos entre maestros que se conecten con metas educativas y brinden todos los recursos necesarios para apoyar prácticas efectivas de enseñanza (Goddard et al., 2000). Finalmente, las limitaciones debido a las necesidades de los estudiantes (BTBGLSN) son críticas para permitir la efectividad docente. Por ejemplo, países como Turquía e Israel tuvieron efectos positivos significativos al minimizar estas limitaciones, lo que sugiere que proporcionar los recursos necesarios a los estudiantes puede mejorar sustancialmente en sus necesidades.

Una limitación de este estudio es el uso exclusivo de datos del conjunto e-TIMSS 2019, que incluye 22 países y excluye a otros analizados en evaluaciones más amplias de TIMSS. Esto reduce el alcance comparativo y limita la generalización de los resultados. Por lo tanto, futuras investigaciones deberían ampliar el análisis a un rango más amplio de países para identificar patrones potenciales y desarrollar hipótesis más sólidas y comprehensivas basadas en los hallazgos. En efecto, expandir el conjunto de datos más allá de e-TIMSS para incluir todos los métodos de recopilación de TIMSS disponibles también mejoraría la generalización de los hallazgos con una gama más amplia de países y sistemas educativos.

Otra limitación es que algunas variables del contexto docente, como el énfasis escolar en el éxito académico y las limitaciones de enseñanza debido a las necesidades de los estudiantes, se basan en opiniones autoinformadas de los docentes. Estas respuestas subjetivas pueden introducir sesgos o inconsistencias que potencialmente afecten la confiabilidad de los resultados. Futuras investigaciones podrían abordarlo incorporando medidas objetivas u observaciones externas como registros administrativos u observaciones en el aula para mejorar la efectividad del análisis. Además, la estandarización de variables del contexto docente como BTBGEAS y BTBGLSN puede influir en la interpretación de sus efectos al normalizar diferencias que podrían tener un significado contextual único en países individuales.

Además, algunos resultados, como las asociaciones negativas entre la experiencia docente y el rendimiento estudiantil observadas en países como Emiratos Árabes Unidos y Georgia, deben interpretarse con cautela. Estas asociaciones podrían estar influenciadas por factores



contextuales no capturados en los modelos, como diferencias estructurales en los sistemas educativos, acceso a recursos o condiciones institucionales que afectan las prácticas docentes. Por ello, existe el riesgo de sobre interpretar estas relaciones sin considerar otros elementos que podrían estar influyendo. Futuras investigaciones podrían abordar esto integrando análisis a nivel país o adoptando un marco HLM de tres niveles para explorar cómo estas variables operan dentro y entre contextos nacionales.

Finalmente, futuros estudios deberían incorporar variables adicionales dentro del contexto docente y escolar, tales como factores socioeconómicos, ubicación urbana o rural de la escuela y actividades de desarrollo profesional docente. Estos factores podrían proporcionar una mejor comprensión de las dinámicas que afectan el rendimiento estudiantil y permitir explorar cómo las políticas educativas nacionales, los sistemas de formación docente y los factores socioeconómicos interactúan con la experiencia docente para influir en el rendimiento académico. Abordar estas limitaciones en futuras investigaciones podría ofrecer mayor robustez y mejor aplicación de los hallazgos.

CONCLUSIONES

En conclusión, este estudio contribuye al desarrollo de un enfoque de investigación sobre el impacto de la experiencia docente y los factores contextuales en el rendimiento estudiantil. Al utilizar datos de e-TIMSS 2019 y modelos lineales jerárquicos, el análisis enfatiza los importantes roles que desempeñan la experiencia docente, el énfasis escolar en el éxito académico y las limitaciones de enseñanza debido a las necesidades de los estudiantes en la promoción del rendimiento en matemáticas. Estos hallazgos tienen una relevancia significativa para los responsables de políticas, docentes y escuelas que buscan mejorar los resultados educativos. En adelante, la efectividad de la experiencia docente y los entornos académicos será clave para promover oportunidades de aprendizaje efectivas.

Además, en el contexto latinoamericano, estos resultados pueden orientar acciones como fortalecer la formación continua docente y proporcionar recursos adicionales para atender aulas con alta diversidad, lo que permitiría mejorar la efectividad de la enseñanza y apoyar de manera más equitativa el aprendizaje en matemáticas.

AGRADECMIENTOS

Expreamos nuestro profundo agradecimiento por todo el apoyo brindado por el Dr. Julien Corven del programa de Master of Science in Mathematics – Applied Statistics de Illinois State University, Normal, Illinois, Estados Unidos de América.



REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aru, S. A., & Kale, M. (2019). Effects of school-related factors and early learning experiences on mathematics achievement: A multilevel analysis to analyse the TIMSS data. *Journal of Education and Training Studies*, 7(4), 259–271. <https://doi.org/10.11114/jets.v7i4.3949>
- Bliese, P. D. (1998). Group size, ICC values, and group-level correlations: A simulation. *Organizational Research Methods*, 1(4), 355–373. <https://doi.org/10.1177/109442819814001>
- Bliese, P. D. (2016). *Multilevel modeling in R: A brief introduction to R, the multilevel package, and the nlme package* (Version 2.7). <https://cran.r-project.org/web/packages/multilevel/index.html>
- Blömeke, S., Olsen, R. V., & Suhl, U. (2016). Relation of student achievement to the quality of their teachers and instructional quality. In T. Nilsen & J.-E. Gustafsson (Eds.), *Teacher quality, instructional quality and student outcomes: Relationships across countries, cohorts, and time* (pp. 21–50). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-41252-8_2
- Cheng, C.-Y., Chen, S. Y., & Lin, S. S. J. (2017). Episodic and individual effects of elementary students' optimal experience: An HLM study. *The Journal of Educational Research*, 110(6), 653–664. <https://doi.org/10.1080/00220671.2016.1172551>
- Clotfelter, C. T., Ladd, H. F., & Vigdor, J. L. (2007). Teacher credentials and student achievement: Longitudinal analysis with student fixed effects. *Economics of Education Review*, 26(6), 673–682. <https://doi.org/10.1016/j.econedurev.2007.10.002>
- Corven, J., DiNapoli, J., Willoughby, L., & Hiebert, J. (2022). Long-term relationships between mathematics instructional time during teacher preparation and specialized content knowledge. *Journal for Research in Mathematics Education*, 53(4), 277–306. <https://doi.org/10.5951/jresmetheduc-2020-0036>
- Goddard, R. D., Hoy, W. K., & Woolfolk Hoy, A. (2000). Collective teacher efficacy: Its meaning, measure, and impact on student achievement. *American Educational Research Journal*, 37(2), 479–507. <https://doi.org/10.3102/00028312037002479>

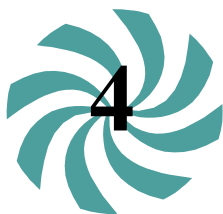


- Goe, L. (2007). *The link between teacher quality and student outcomes: A research synthesis*. National Comprehensive Center for Teacher Quality. <https://files.eric.ed.gov/fulltext/ED521219.pdf>
- Gravemeijer, K., Stephan, M., Julie, C., Lin, F.-L., & Ohtani, M. (2017). What mathematics education may prepare students for the society of the future? *International Journal of Science and Mathematics Education*, 15(Suppl 1), 105–123. <https://doi.org/10.1007/s10763-017-9814-6>
- Gustafsson, J.-E., & Nilsen, T. (2016). The impact of school climate and teacher quality on mathematics achievement: A difference-in-differences approach. In T. Nilsen & J.-E. Gustafsson (Eds.), *Teacher quality, instructional quality and student outcomes. Relationships across countries, cohorts and time* (pp. 81–95). Springer International Publishing Cham. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-41252-8>
- Hill, H. C. (2007). Mathematical knowledge of middle school teachers: Implications for the No Child Left Behind policy initiative. *Educational Evaluation and Policy Analysis*, 29(2), 95–114. <https://doi.org/10.3102/0162373707301711>
- Jacobs, V. R., Lamb, L. L. C., & Philipp, R. A. (2010). Professional noticing of children's mathematical thinking. *Journal for Research in Mathematics Education*, 41(2), 169–202. <https://doi.org/10.5951/jresmetheduc.41.2.0169>
- Kini, T., & Podolsky, A. (2016). *Does teaching experience increase teacher effectiveness? A review of the research*. Palo Alto: Learning Policy Institute. <https://learningpolicyinstitute.org/our-work/publications-resources/does-teaching-experience-increase-teacher-effectiveness-review-research>.
- Lindquist, M., Philpot, R., Mullis, I. V. S., & Cotter, K. (2019). *Mathematics performance across national and international contexts: Insights from the TIMSS 2019 assessment*. TIMSS & PIRLS International Study Center, Boston College. <https://timss2019.org/reports/index.html>
- Lindström, M., Johansson, S., & Borger, L. (2024). Does formal teacher competence matter for students' mathematics achievement? Results from Swedish TIMSS 2019. *Educational Research and Evaluation*. <https://doi.org/10.1080/13803611.2024.2367486>
- Martin, M. O., Mullis, I. V. S., Foy, P., Kelly, D. L., & Fishbein, B. (2020). *TIMSS 2019 international results in mathematics and science*. TIMSS & PIRLS International Study Center, Boston College. <https://timss2019.org/reports/>



- Raudenbush, S. W., & Bryk, A. S. (2002). *Hierarchical linear models: Applications and data analysis methods* (2nd ed.). Sage Publications.
- Şahin, M. G., & Öztürk, N. B. (2018). How classroom assessment affects science and mathematics achievement?: Findings from TIMSS 2015. *International Electronic Journal of Elementary Education*, 10(5), 559–569. <https://iejee.com/index.php/IEJEE/article/view/466/352>
- Shuls, J. V., & Trivitt, J. R. (2015). Teacher qualifications and productivity in secondary schools. *Journal of School Choice*, 9(1), 49–70. <https://doi.org/10.1080/15582159.2015.998964>
- TIMSS & PIRLS International Study Center. (2019). *TIMSS 2019 international results in mathematics and science*. Boston College, Lynch School of Education and Human Development. <https://timss2019.org/reports/>
- Toropova, A., Johansson, S., & Myrberg, E. (2019). The role of teacher characteristics for student achievement in mathematics and student perceptions of instructional quality. *Education Inquiry*. <https://doi.org/10.1080/20004508.2019.1591844>





Diversidad ecológica de los mamíferos de isla Coiba, Parque nacional Coiba, Panamá

Ecological diversity of mammals of Coiba Island, Coiba National Park, Panama

Pedro G. Méndez-Carvajal

Universidad de Panamá, Fundación Pro-Conservación de los Primates Panameños (FCPP), Panamá.

mendez55.pm@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0003-1306-5869>

Karol M. Gutiérrez-Pineda

Universidad de Panamá, Fundación Pro-Conservación de los Primates Panameños (FCPP), Panamá.

madelinekarol@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0003-1306-5869>

Autor de correspondencia: pedro.mendezc@up.ac.pa

Fecha de recepción: 6 de marzo de 2026

Fecha de aceptación: 10 de abril de 2026

DOI: <https://doi.org/10.48204/j.tecno.v8n2.a10847>

RESUMEN

Estudios de diversidad ecológica de mamíferos en islas exponen que el tamaño del área insular afecta los índices de riqueza, dominancia y equidad de las especies, por lo que, a mayor tamaño del área, mayor riqueza y equidad, así como menor dominancia. El Modelo de Biogeografía Insular explica que esto se debe al equilibrio entre las fuerzas opuestas de extinción e inmigración, ya que una mayor área ofrece diferentes tipos de nichos para especies con diferentes especialidades ecológicas. Nuestro objetivo fue estimar la diversidad ecológica de mamíferos en Isla Coiba, Parque Nacional Coiba, Panamá. Este trabajo se llevó a cabo desde 2010 de manera *Ad-hoc*, y de manera sistemática para el periodo de 2018 a 2022. Para la detección de los mamíferos utilizamos transectos de franja, redes de niebla, cámaras trampa en el sotobosque y el Sistema de Cámaras Orión (SCO) para detectar mamíferos arborícolas. También identificamos algunas especies por rastros, cadáveres o huesos encontrados dentro de la isla. Logramos la detección de 23 especies de mamíferos, 20 fueron identificadas por observación directa, pertenecientes a 7 órdenes, 16 familias, y 22 géneros. Según los índices de biodiversidad ecológica, existe una riqueza de especies moderada, sin embargo, los estimadores de riqueza de especies y la gráfica de rarefacción indican que hay posibilidad de que existan más especies que no han sido detectadas. Esto es posible, ya que el estudio se centró en detectar las especies de mamíferos que se encuentran desde la costa hasta un máximo de 2 km adentro del manglar y bosque maduro de la isla. Encontramos una baja dominancia



de especies y una equidad media, favoreciendo a la heterogeneidad intra-isla, y a la coexistencia de una mayor riqueza de especies con diferentes tipos de nicho, especialidad ecológica y favoreciendo un aumento en las tasas de especiación a través del tiempo. Este trabajo es de importancia para conocer el estado actual de las poblaciones de diferentes especies que se encuentran en la isla y valorar su papel ecológico.

PALABRAS CLAVE

Fauna arborícola, Biogeografía, Ecología de islas, Sistema de Cámaras Orión

ABSTRACT

Studies of ecological diversity of mammals on islands show that the size of the island's area affects the indices of richness, dominance and equity of the species, therefore, the larger the area, the greater the richness and equity, as well as the lower the dominance. The Island Biogeography Model explains that this is due to the balance between the opposing forces of extinction and immigration, as a larger area offers different types of niches for species with different ecological specialties. Our objective was to estimate the ecological diversity of mammals on Coiba Island, Coiba National Park, Panama. This work was carried out since 2010 on an *Ad-hoc* basis, and systematically for the period from 2018 to 2022. To detect mammals we use line transects, mist nets, camera traps in the understory and the Orion Camera System (SCO) to detect arboreal mammals. We also identify some species by tracks, corpses or bones found within the island. We managed to detect 23 species of mammals, 20 were identified by direct observation, belonging to 7 orders, 15 families, and 22 genera. According to the ecological biodiversity indices, there is a moderate species richness; however, the species richness estimators and the rarefaction graph indicate that there is a possibility that there are more species that have not been detected. This is possible, since the study focused on detecting mammal species found from the coast to a maximum of 2 km inside the mangrove and mature forest of the island. We found low species dominance and medium equity, favouring intra-island heterogeneity, and the coexistence of greater species richness with different types of niche, ecological specialty, and favouring an increase in speciation rates over time. This work is important to know the current status of the population of different species found on the island and to value its ecological role.

KEYWORDS

Arboreal fauna, Biogeography, Island Ecology, Orion Camera System

INTRODUCCIÓN

La diversidad ecológica de las islas difiere cuantitativamente de las continentales (Cronk, 1997; Losos & Schluter, 2000). Las islas a diferencia de las áreas continentales se caracterizan por tener pocos o moderados niveles de diversidad de especies, pero un mayor porcentaje de endemismo (Kier et al., 2009). Según el Modelo de Biogeografía Insular de MacArthur & Wilson (1967), la riqueza, abundancia y dominancia de las especies se ven influenciadas por el área de la isla y aproximación con el área continental. Se espera que islas más grandes y menos aisladas presenten una mayor diversidad ecológica, esto a través del equilibrio de las fuerzas opuestas de extinción e inmigración (MacArthur & Wilson, 1967; Losos, 1996). Un estudio realizado en la región de la bahía de Chippewa del río San Lorenzo



en Canadá buscó evaluar la influencia del área insular en las tasas de inmigración de cánidos, encontrando que las inmigraciones aumentaron significativamente con el área insular (Lomolino, 1990). Por otro lado, también se espera que haya mayor especiación o endemismo en islas con áreas más grandes (Lomolino, 1990). Tal como reportaron Barreto et al (2021), donde a mayor área mayor riqueza de especies de mamíferos, aunque las islas que se encuentran más separadas del área continental, o que lo han estado en el pasado, pueden llegar a tener más especies endémicas, pero menor riqueza. A nivel de dominancia y equidad en islas, se sabe que estas variables de diversidad ecológica están dadas por el tamaño del área y la heterogeneidad del hábitat, incluyendo su topografía y condiciones microclimáticas tal cual reportan Hortal et al (2009). Esto se demostró en plantas para la hipótesis de Relación Espacial de Especies (SAR por sus siglas en inglés), donde entra un nuevo problema a la comprensión de la dinámica de islas, adicionando que la relación de un grupo de especies, su equidad y diversidad de hábitats influirá en las dominancias de algunas especies (Kallimanis et al., 2008). Esto también lo comprueba Stein et al (2014), de manera cuantitativa, concluyendo que existen relaciones positivas entre heterogeneidad y riqueza, siendo variables claves en esta diversidad los tipos de hábitat, taxones y escalas espaciales. Los estudios anteriores han mostrado que es importante estudiar la diversidad ecológica de diferentes grupos de especies en islas, ya que generan información de interacciones interespecíficas que moldean la riqueza, abundancia y equidad, de acuerdo con las especializaciones ecológicas de estas especies y los diferentes tipos de nichos que puedan brindar las islas (Ricklefs & Lovette, 1999; Kisel & Barraclough, 2010; Beaugrand et al., 2024). En Panamá, contamos con diferentes islas, tanto de la costa Pacífica como de la costa Caribe, pero muy pocos trabajos se han realizado en términos de índices de diversidad ecológica. Uno de los casos más interesantes es Isla Coiba, siendo la más grande del Pacífico centroamericano (Steinitz et al., 2005; Ibañez, 2011; Méndez-Carvajal, 2019). Los primeros estudios de colecta de especímenes en las islas del Pacífico panameño se remontan a los 1900's, con muestreos *Ad-hoc* por parte de Joseph H. Batty, eventualmente referidos en trabajos de taxonomía de Allen (1902); Thomas (1902); y Goldman (1920), luego ya a nivel sistemático los trabajos de Ibañez et al (1997), listan la diversidad de especies de mamíferos terrestres que presentaban las islas del Parque Nacional Coiba, detectando 38 especies, siendo el grupo predominante el de los quirópteros (Ibañez et al., 1997). De esas 38 especies, se sabe que al menos cuatro de ellas son endémicas de Coiba, cumpliéndose una de las premisas de la teoría de islas que recalca la importancia del tamaño y el ofrecimiento de nicho ecológico, para favorecer la riqueza así como el endemismo (MacArthur & Wilson, 1967; Lomolino, 1990).

Algunas

discrepancias

en la literatura trajeron a la luz algunos taxos de dudosa procedencia por parte de J.H. Batty, por lo que se propone más muestreos en estas islas para determinar presencia real y autenticidad en especies consideradas endémicas de algunas islas, incluyendo Coiba (Olson, 2008). En el 2010, se reporta una nueva especie de roedor nativo en Coiba, el *Zygodontomys brevicauda* sugiriendo revisión por posible nueva especie y una rata *Rattus rattus frugivorous* introducida (González et al., 2010). Esto nos indica que aún falta más por conocer a nivel de



riqueza de especies en Coiba. De igual manera, falta conocer de manera general cómo está la dominancia y equidad de mamíferos terrestres y confirmar algunas especies de arreglo ecológico, y cómo el ser humano por su influencia ha incrementado o mermado especies en esta isla, dado que ha sido poblada anteriormente por diversas razones tal cual lo citan Garrido-Pérez & Bastidas (2025). En este trabajo tenemos como objetivo evaluar la diversidad ecológica de mamíferos en Isla Coiba, Parque Nacional Coiba. Consideramos que esta información servirá de herramienta clave para evaluar el estado de conservación de especies endémicas y sobre algunas otras especies que actualmente no cuentan con una evaluación de su estado de conservación o bien no han sido descubiertas en esta isla.

MATERIALES Y METODOS

Área de estudio

El estudio se llevó a cabo en seis puntos de Isla Coiba (7°26'00"N 81°46'00"O), Parque Nacional Coiba, costa del Pacífico al suroeste de la República de Panamá (Figura 1). Coiba es la isla más grande del Pacífico panameño y centroamericano, posee una extensión territorial de 503 km² (Blewett et al., 2021). Posee una precipitación pluvial promedio de 3,403 mm anuales y temperatura promedio de 26.4 °C (Ibañez, 2011). La isla tiene topografía escarpada, con 50% de similitud a la composición boscosa de tierra firme y con ríos caudalosos, mantiene un 93% de su área con bosque (Ibañez, 2011). Los puntos de muestreo fueron en los siguientes senderos ya establecidos por investigaciones botánicas y ornitológicas: Los Pozos (7°26'14.5"N 81°43'39.4"O) con altura promedio de 21 metros sobre el nivel medio del mar (msnmm), La Torre (7°31'56.4"N 81°51'10.7"O), con altura promedio de 200 msnmm, Los Monos (7°36'01.5"N 81°43'32.2"O) con altura de 53 msnmm, Gambute (7°37'35.5"N 81°43'46.5"O) con altura promedio de 12 msnmm, La X (7°36'51.9"N 81°43'57.8"O) y altura promedio de 50 msnmm. Todos los senderos presentan diversidad de hábitats como costa rocosa, estero, manglar, quebradas poco profundas, bosque intervenido, bosque inundable, pastizal, bosque maduro de entre 15 a 50 m de altura, bosque submontano en el caso de Sendero La Torre. Nuestras observaciones recopilaron un total de 19,005.30 horas de esfuerzo de muestreo (Tabla 1).

Detección de mamíferos

Se realizaron observaciones *Ad-hoc* desde 2010, en las mismas zonas de muestreo sistemático mencionadas (Tabla 1). Los muestreos para detección sistemática de mamíferos se realizaron desde julio 2018 a agosto 2022. Utilizamos cinco métodos de detección de especies siguiendo Wilson et al (1996), a saber: detección directa e indirecta por rastro (huellas, huesos y otros rastros), implementamos un transecto de franja de 1 a 2 km de largo en todos los senderos, con recorridos con distancia longitudinal promedio velocidad de caminata/observación de 1 km/hora, en tres periodos del día (06:00 a 07:00 hrs, 18:00 a 19:00 hrs y de 00:00 a 01:00 hrs). Para la captura e identificación de murciélagos se muestreó únicamente en los senderos de Los Pozos, Gambute y La Torre, utilizando de una a tres redes



de niebla de 5 bolsas, de 3 m de alto y de 12 m de largo, activas de 18:00 a 01:00 hrs siguiendo Wilson et al (1996). Utilizamos la clave de murciélagos de Panamá de Handley (1981), y se confirmaron dudas con ilustraciones e información ecológica provista en la guía de mamíferos de Centroamérica y sur de México (Reid, 1997). También utilizamos cámaras trampa Bushnell Trophy Cam, en total se colocaron dos en el sotobosque para Los Pozos y Playa Machete, y ocho cámaras trampa en el resto de los senderos, instaladas a 12 metros de altura por medio del Sistema de Cámaras Orión (SCO) (Méndez-Carvajal, 2014). Esta investigación a largo plazo implica los permisos científicos respectivos emitidos por el Ministerio de Ambiente con número ARB-0029-2021.



Tabla. 1

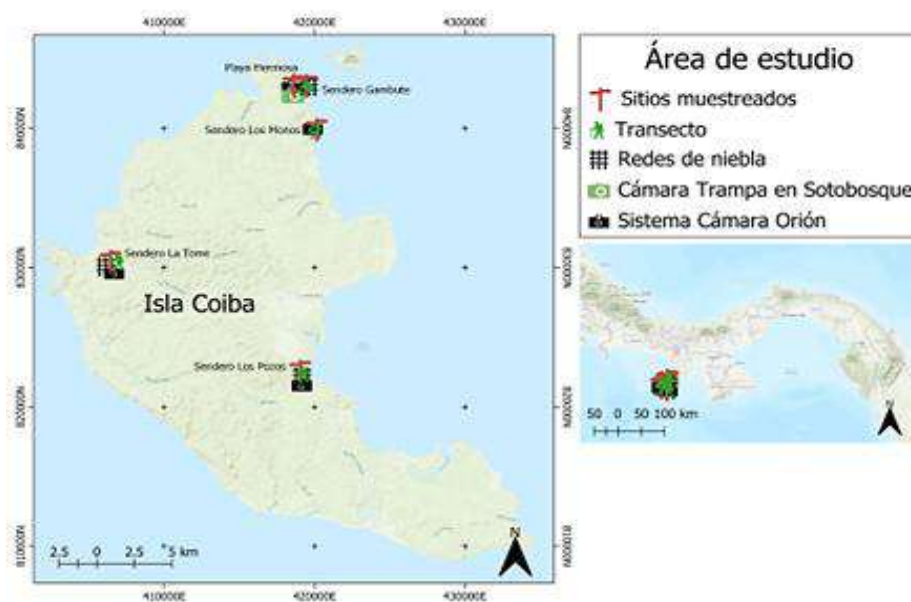
Detalles de giras y esfuerzo de muestreo en las áreas de estudio para Isla Coiba e isla Jicarón en este estudio.

Fecha de giras	Lugares visitados	Horas de Transectos y Obs. <i>Ad-libitum</i>	Horas red	Horas cámaras
18-22 de marzo de 2010	Los Pozos, Playa Rosario, Machete, Cerro La X	360	Los Pozos (24 hrs) La Torre (24 hrs)	X
14-20 de julio de 2010	Los Pozos, Playa Rosario, Machete, Cerro La X, La Torre-Playa Hermosa	432	Los Pozos (24 hrs) La Torre (24 hrs)	X
17-20 de septiembre de 2010	Los Pozos, Gambute	288	Gambute (24 hrs) Los Pozos (24 hrs)	X
17-23 de junio de 2018	Los Monos, La Ceiba, Gambute	432	X	X
22-27 de julio de 2018	La Torre, Los Pozos, Gambute	360	X	T1-Los Monos 4,287.33 T2-Los Pozos 822.36
6-10 de septiembre de 2018	Los Monos, La Ceiba, Gambute	360	X	T2-Los Monos 3,132.35
4-7 de junio de 2019	Gambute, Playa Machete, Los Pozos	288	Gambute (24 hrs) Los Pozos (24 hrs)	T3-La Torre 1,914.53
16-20 de julio de 2019	Gambute, La Ceiba-Los Monos, Los Pozos, Machete	360	Gambute (24 hrs) Los Pozos (24 hrs)	X
17-20 de agosto de 2019	Gambute, Playa Machete, Los Pozos	288	Gambute (24 hrs) Los Pozos (24 hrs)	T5-La Torre 673.05
14-18 de septiembre de 2019	Los Monos, La Ceiba, Gambute	288	X	X
20-24 de agosto de 2020	Los Pozos, Gambute, Estación La Ceiba	360	Gambute (24 hrs) Los Pozos (24 hrs)	T4-Los Pozos 1,306.20
2-5 de junio de 2021	Gambute, Jicarón, Los Pozos, Machete	288	Gambute (24 hrs) Los Pozos (24 hrs)	T6-Machete 2,021.48
15-19 de agosto de 2022	Los Pozos, Sendero Santa Cruz, Cerro Gambute, Sendero Los Monos, Estación La Ceiba	360	X	X
		4,464	384	14,157.3



Figura 1

Sitios de estudio en Isla Coiba, Parque Nacional Coiba, Panamá.



Análisis de los datos

Se utilizó el programa Excel para ordenar la base de datos y el software Past 4.03, para calcular los índices de diversidad ecológica; Dominancia(D), Simpson(1-D), Shannon(H'), Margalef, Equitatividad y Chao-1. También realizamos una curva de rarefacción para evaluar la riqueza y una proyección potencial de cuanto falta por descubrir en Isla Coiba respecto a mamíferos terrestres (Barreto et al., 2021). Calculamos el índice de Jaccard para evaluar la similitud en la presencia de mamíferos arborícolas y terrestre entre los diferentes sitios de muestreo. Asimismo, se calculó este índice para evaluar la similitud en la presencia de murciélagos entre los sitios donde colocamos las redes de niebla.

RESULTADOS

Diversidad alfa de mamíferos en Isla Coiba

Logramos la detección de 23 especies de mamíferos, 20 fueron identificadas por observación directa, pertenecientes a 16 familias, 22 géneros y siete órdenes (Tabla 2).

Tabla 2

Especies, géneros y ordenes de mamíferos detectados e identificados en este estudio.

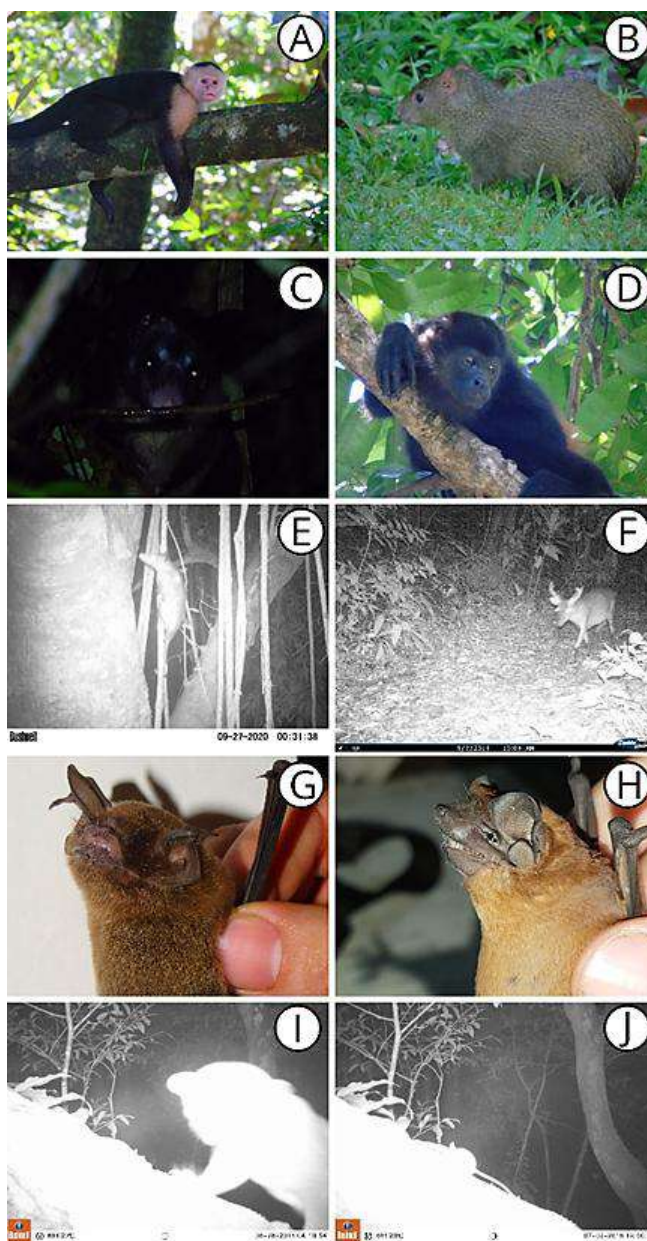
Taxa	Orden Familia	Especie	UICN	ML
	Orden Didelphimorphia Familia Didelphidae			
1		<i>Caluromys derbianus</i>	LC	T
2		<i>Didelphis marsupialis battyi</i>	LC	TSCO
3		<i>Philander opossum</i>	LC	T
	Orden Cingulata Familia Dasypodidae			
4		<i>Dasypus novemcinctus</i>	LC	H
	Orden Chiroptera Familia Phyllostomidae			
5		<i>Artibeus jamaicensis</i>	LC	RN
6		<i>Carollia perspicillata</i>	LC	RN
7		<i>Desmodus rotundus</i>	LC	RN
8		<i>Tonatia saurophila</i>	LC	RN
9		<i>Phyllostomus discolor</i>	LC	T
	Familia Molossidae			
10		<i>Molossus coibensis</i>	LC	RN
	Familia Vespertilionidae			
11		<i>Myotis nigricans</i>	LC	RN
	Familia Mormoopidae			
12		<i>Pteronotus parnellii</i>	LC	RN
	Familia Noctilionidae			
13		<i>Noctilio leporinus</i>	LC	T
	Familia Emballonuridae			
14		<i>Saccopteryx leptura</i>	LC	T
	Orden Primates Familia Atelidae			
15		<i>Alouatta coibensis coibensis</i>	EN	T, SCO
	Familia Cebidae			
16		<i>Cebus imitator</i>	VN	T, SCO, CS
	Orden Rodentia Familia Dasyproctidae			
17		<i>Dasyprocta coibae</i>	NT	T, CS
	Familia Sciuridae			
18		<i>Sciurus granatensis</i>	LC	SCO
19		<i>Sciurus spp.</i>	¿?	SCO
	Familia Cricetidae			
20		<i>Oecomys spp.</i>	¿?	SCO
	Orden Carnivora Familia Procyonidae			
21		<i>Potos flavus</i>	LC	SCO
	Orden Artiodactyla Familia Cervidae			
22		<i>Mazama americana</i>	DD	H
23		<i>Odocoileus virginianus r.</i>	LC	T, CS, H

Leyenda: UICN: Estado de conservación según la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza, ML: Método de localización), T: Transecto; RN: Red de niebla; CS: Cámara trampa en sotobosque; SCO: Sistema de Cámaras Orión, H: Huella/Huesos; ¿?: Desconocido/posiblemente. Color verde: confirmación de la presencia de la especie; Color rojo: nuevo registro de especie; Color gris: posible nuevas especies.



Figura 2

Algunas especies de mamíferos detectados en Isla Coiba por este estudio: A) *Cebus imitator*; B) *Dasyprocta coibae*; C) *Philander opossum*; D) *Alouatta coibensis coibensis*; E) *Didelphis marsupialis battyi*; F) *Odocoileus virginianus rothschildi*; G) *Pteronotus parnellii*; H) *Molossus coibensis*; I) *Potos flavus*; J) *Roedor desconocido*.



Los índices de diversidad ecológica de mamíferos obtenidos en este estudio, nos muestran que existe una riqueza de especies moderada en Isla Coiba (Tabla 2). Mientras que los análisis de Chao 1 y la curva de rarefacción de riqueza de especies de mamíferos nos indica que esta riqueza de especie puede aumentar (Tabla 3).

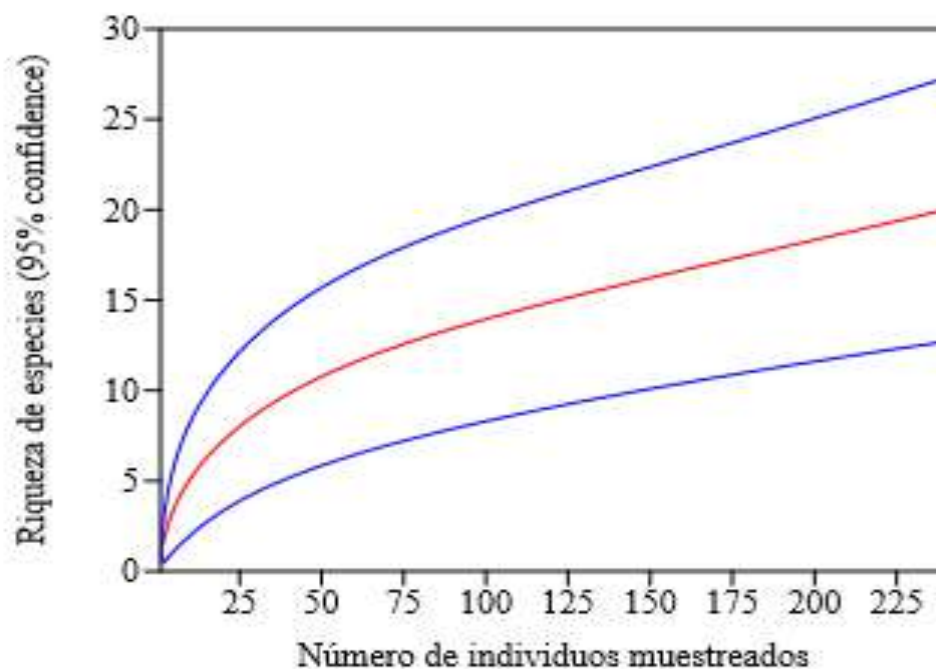
Tabla 3

Índices de Diversidad Ecológica de los mamíferos de Isla Coiba, Parque Nacional Coiba, Panamá.

Índices	Valor
Riqueza de especies	20
Dominancia_D	0.2
Simpson_1-D	0.8
Shannon	2.0
Margalef	3.5
Equidad	0.7
Chao-1	65

Figura 3

Curva de rarefacción de la riqueza de especies mamíferos de Isla Coiba.



Los senderos Gambute y Machete fueron los que presentaron mayor índice de similitud de especies de mamíferos terrestres, arborícolas y escansorios, seguido por el sendero de Playa hermosa y Machete (Tabla 4). Los senderos con menor índice de similitud fueron entre sendero Los Monos y sendero Los Pozos, y el sendero Los Monos y Gambute.

Encontramos que los índices de similitud de riqueza de murciélagos entre los diferentes sitios de muestreo fueron bajos. La mayor similitud que encontramos fue de 0.20 entre el Sendero de Los Pozos y el Sendero de Playa hermosa, donde la especie compartida fue *Carollia perspicillata*. Mientras que el sendero Gambute y el sendero Los Pozos hubo una similitud de 0.14, donde la única especie que compartieron fue *Pteronotus parnellii*. Por otro lado, encontramos que los senderos de Playa hermosa y Gambute no compartieron ninguna especie de murciélagos.

Tabla 4

Índice de similitud de la riqueza de mamíferos terrestres, arborícolas y escansorios entre los diferentes sitios de muestreo en Isla Coiba, Panamá.

Sitios de muestreo	LP	M	G	PH	LM
LP	1.00	0.57	0.43	0.44	0.36
M	0.57	1.00	0.75	0.67	0.50
G	0.43	0.75	1.00	0.50	0.38
PH	0.44	0.67	0.50	1.00	0.40
LM	0.36	0.50	0.38	0.40	1.00

Leyenda: LP (Sendero Los Pozos); M (Machete); G (Sendero Gambute); PH Sendero La Torre (Playa Hermosa); LM (Sendero Los Monos).

DISCUSIÓN

Nuestro trabajo coincidió en un 38% con las especies de mamíferos terrestres detectadas en isla Coiba por Ibañez et al (1997), validando la presencia de *Caluromys derbianus* y *Mazama temama* cuestionados por Ibañez et al (1997) y a nivel de endemismo por Olson (2008). El venado *Mazama temama* fue avistado en Coiba como mascota de la estación científica en Gambute para los años de 1999 y 2001 (P.G. Méndez-Carvajal, obs. Pers.) (Méndez-Carvajal, 2019). En nuestro muestreo se detectaron muchas de sus huellas en el sendero Los Pozos, distintas a las de *O. v. rotschildii*, quien también fue detectado en este sendero. Se



adicionaron seis especies nuevas a la lista; el armadillo *Dasypus novemcinctus*, un mamífero nocturno cavador carroñero; el cuzumbí *Potos flavus*, un mamífero nocturno arborícola estricto, que posee cola prensil; dos ardillas posiblemente del género *Sciurus*; un ratón nocturno que presuntamente podría pertenecer al género *Oecomys* por su hábito arborícola y sus características morfológicas. También se detectó la presencia de la zorra cuatro ojos *Phyllander opossum*, un marsupial nocturno arborícola. Estas especies coinciden en presencia con datos de tierra firme relacionados a los cuerpos de tierras que estuvieron anteriormente conectados con Coiba, tal como lo indica Ibañez (2011) en su historial biogeográfico de las islas, incluyendo similitudes con los mamíferos reportados en Bahía Honda hasta de un 45% comparado con Samudio & Pino (2005), Punta Burica, Golfo de Montijo, Isla Leones e Isla San Pedro (Méndez-Carvajal y Gutiérrez-Pineda, datos sin publicar). Algunas especies de mamíferos que encontramos en Coiba y otras islas del Pacífico suroeste de Panamá también fueron previamente detectadas por investigadores a principios de los 1900's, especies como *Molossus coibensis* se encontraron no solo en Coiba, sino que su distribución fue reportada hasta el lago Gatún en la Cuenca del Canal de Panamá (Allen, 1904). La especie *Dasypus novemcinctus* no es raro se encuentre en Coiba, aunque quizá en menos densidad, es un mamífero reportado en islas del Pacífico suroeste de Panamá, tales como; Isla Brava, Isla Cébaco, Paridas, San Miguel, e Isla Sevilla (Thomas, 1902). La especie podría haber disminuido en población dependiendo de su uso como fuente de proteína por parte de los habitantes de Coiba en algunas de sus etapas de transición, ya sea habitantes indígenas que hayan diezmado por cacería poblaciones de mamíferos presa, o bien buscadores de perlas, o por los españoles quienes establecieron estructuras y cambios de paisaje en algunas regiones de la isla (Ibañez, 2011; Garrido-Pérez y Bastidas, 2026). Estos impactos antropogénicos, por lo explorado hasta el momento, nos indican un conocimiento general de uso, pero solo hasta la zona periférica de la isla, misma donde hemos realizado nuestros estudios.

El índice obtenido por el estimador Chao 1 y la curva de rarefacción de riqueza de especies de mamíferos, sugiere que ésta debería aumentar en zonas más adentradas de la isla. Nuestras proyecciones de riqueza de especies concuerdan con el Modelo de Biogeografía Insular propuesto por MacArthur & Wilson (1967), donde a mayor tamaño de área se puede sustentar una mayor riqueza, creando un equilibrio entre las fuerzas opuestas de extinción e inmigración (MacArthur & Wilson, 1967; Hortal et al., 2009). Por otro lado, los índices de dominancia y equidad muestran que hay dominancia de algunas especies de mamíferos (Tabla 3), pero no lo suficiente para que éstas dominen completamente el hábitat en Coiba, apoyando la hipótesis de heterogeneidad de hábitats discutida por Kalimanis et al (2008). Las especies de mamíferos que pueden estar influyendo en este grado de dominancia son los primates *Cebus imitator* y *Alouatta coibensis coibensis*, ya que tienen hábitos arborícolas, gregarios y omnívoro/vegetarianos, dándole un papel importante como podadores, consumidores directos (dispersores y polinizadores) pero a su vez suplidores de



recurso a la fauna del sotobosque, promoviendo así un arreglo de especies combinadas que se repiten en varias partes de la isla (ej. mono, ñeque y venado) (Bourlière, 1985; Kalimanis et al., 2008). Al momento de contabilizarlos hay mayor cantidad de individuos contrastando con otras especies que son de hábitos solitarios. Los niveles bajos de dominancia encontrados en la isla pueden deberse a su área extensa y topografía accidentada, lo que favorece a la heterogeneidad intra-isla, esto a su vez beneficia la coexistencia de una mayor riqueza de especies con diferentes tipos de nicho, especialidad ecológica y pudiera favorecer un aumento de las tasas de especiación a través del tiempo de acuerdo a lo planteado por Kisel & Barraclough (2010) y Stein et al. (2014). Este tipo de información es clave para poder hacer evaluaciones del estado de conservación de las especies que ahí habitan y proyectar a futuro otros muestreos a mayor profundidad en temas de diversidad interna de Coiba. Una vez conociendo donde están o donde predominan las especies, se puede dar seguimiento de ecología poblacional y tener una mejor perspectiva de como pudieran estar fluctuando las respectivas poblaciones, sobre todo aquellas especies endémicas u otras que pudieran ser nuevas especies para la ciencia, y sobre todo para aquellas especies con data insuficiente o que aún no se han evaluado.

La baja similitud de especies de murciélagos entre los diferentes sitios de muestreo consideramos que puede deberse a la diferencia de composición florística entre la zona norte con la zona este y oeste de la isla. Estudios botánicos realizados por Ibañez (2011), demuestran diferencias significativas entre la flora del norte en Coiba (Cerro La X y Playa Rosario) muy cercanas a nuestras zonas de estudio (Gambute, Playa Machete, Los Monos), pero remarca mayormente diferencias en altura promedio de los árboles. La zona norte se compone de árboles altos de casi 50 m y menor densidad de arbustos en el sotobosque, en comparación con los laterales de Coiba este y oeste, con árboles de 30 m y mayor densidad de arbustos en sotobosque. Los árboles altos podrían estar permitiendo mayor espacio entre el dosel y el estrato medio del bosque para que murciélagos insectívoros como *Pteronotus parnelli* puedan pasar con mayor facilidad, ya que esta especie utiliza corredores y se les facilita la ecolocalización para obtener insectos en vuelo de acuerdo con Queiroz de Oliveira et al (2015). La presencia de *Carollia perspicillata* se detectó en casi todos los puntos de muestreo, pero con mayor frecuencia en los lados este y oeste de Coiba, indicando una presencia alta de árboles de la familia Piperaceae, ya que esta especie se alimenta mayormente en zonas del sotobosque en bosque bajo, una característica florística descrita por Ibañez (2011). En Coiba se reportan al menos 12 especies de piperáceas en toda la isla (Pérez et al., 1996; Ibañez, 2011). Se ha encontrado relación entre el pico reproductivo de *C. perspicillata* justo al momento de fructificación de piperáceas, y esto a su vez correlacionado con los picos de lluvia, ya que estas plantas aumentan su producción de frutos a mayor pluviosidad (Ribeiro-Mello et al., 2004). La presencia del murciélago vampiro *Desmodus rotundus* en sus dos versiones de coloración (rojiza y gris) fue notoria en Los Pozos para el 2010, probablemente debido a que aun existían semovientes pastando



la zona trasera de los pozos termales (Méndez-Carvajal, 2012; 2019). Los *D. rotundus* pueden considerarse los mayores depredadores de Coiba, por su generalidad de presas sin importar su ritmo circadiano, la lista incluye desde ardillas, ñeques, zarigüeyas, monos y cérvidos, por lo que el haber removido las reses y búfalos de la isla a partir de 2016, fue un paso positivo para mantener el equilibrio natural de la fauna mastozoológica de Coiba (Brown & Escobar, 2023). Otro murciélago observado que mayormente ha utilizado las infraestructuras vacías y abandonadas del penal como refugio en Coiba son los *Phillostomus discolor*, un murciélago omnívoro que consume néctar y frutos, aunque recientemente se ha reportado incluso depredando pequeños mamíferos y anfibios, lo que le da un espectro faunívoro para el ecosistema de Coiba (Rodríguez-Segovia et al., 2024). Existen muchas otras especies que aportan al ecosistema de la isla en términos de reguladores de insectos, anfibios, dispersores de semillas y polinizadores, pero estos mencionados han sido en nuestros muestreos los más comunes, incluyendo por supuesto al *Artibeus jamaicensis*, que, a diferencia de otros ecosistemas de tierra firme, no aparece tan abundante en islas del Pacífico, manglares y Golfo de Montijo (Méndez-Carvajal, P.G. obs. Pers.). Se distinguen a nivel de ecología dos tipos de tétradas importantes que consideramos podrían ser claves para sostener la estabilidad de Coiba; la tétrada diurna compuesta por un grupo dispersor-polinizador-dispersor como el mono aullador *A. c. coibensis*, un meso-predador omnívoro con forrajeo escansorio como el mono cariblanco *Cebus imitator*, un roedor o mamífero pequeño que sea dispersor de semilla en sotobosque como el ñeque *Dasyprocta coibae*; mientras que en la noche estos papeles los mantienen la tétrada nocturna bajo el mismo orden mencionado; *Potos flavus*, *O.v. rotschildii*, y los murciélagos. Todos estos mamíferos deben ser monitoreados a nivel poblacional a largo plazo para comprender la dinámica de la isla y reconocer a tiempo cambios extrínsecos que pudieran afectar sus poblaciones y atentar contra estas tétradas. En ambas el depredador existe de manera más sutil que en otros ecosistemas, hasta el momento no se conoce la presencia de felinos ni depredadores mayores que reptiles como el cocodrilo, la boa y la culebra equis, gavilanes y murciélagos vampiros, que cumplen la cuarta función en el ecosistema, la de controlar a las poblaciones anteriores, sin embargo, deben ser estudiadas en conjunto con las actividades antropogénicas ya que estas últimas son predecibles y contundentes para el bienestar de este ecosistema único de Panamá.

Reflexiones de Conservación

Es imprescindible continuar con el estudio científico de los diversos grupos de mamíferos terrestres de Coiba, manteniendo el respeto por la ciencia clásica no invasiva, para evitar accidentes no renovables. No es viable incorporar especies externas a la isla, sino reforzar la filtración en las entradas y salidas al parque, mantener un monitoreo constante de sus poblaciones claves indicadoras y una integración multidisciplinaria que ayude a comprender a este ecosistema. El tema turismo sigue siendo una gran preocupación, ya que, aunque es una fuente de posible autogestión en pro del parque nacional, no debe



comprometer su estudio científico, mismo que debe ser siempre la prioridad. Escenarios invasivos como capturas, usos de radio collar, colectas masivas de especímenes, o bien corte de trochas y otras actividades, deben ser cuestionadas y sustentadas con rigor científico alto por el Comité Científico de Isla Coiba y el Ministerio de Ambiente.

CONCLUSIONES

Nuestros datos apoyan a que Isla Coiba presenta una riqueza de especies de mamíferos moderada, sin embargo, los estimadores de riqueza de especie y la gráfica de rarefacción nos indican que hay posibilidad de aumentar el número de especies reportadas. Esto es posible, ya que el estudio se centró en detectar las especies de mamíferos que se encuentran en el borde de la isla y no se sabe nada en el interior de esta. A nivel de dominancia, se encontró que es baja. Consideramos que estos niveles bajos de dominancia pueden deberse al tamaño de la isla, favoreciendo la coexistencia de una mayor riqueza de especies de mamíferos.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a la Fundación Pro-Conservación de los Primates Panameños (FCPP), a la Universidad de Panamá por los fondos de investigación VIP-CEIP-01-04-06-2019-11 y a la Estación Científica Coiba (COIBA AIP) por proporcionar fondos y equipos para este proyecto. Al Ministerio de Ambiente de Panamá por su apoyo en los permisos científicos, durante la recolección de muestras, y ayuda en la logística de transporte entre los sitios dentro del Parque Nacional Coiba, especialmente al equipo de Guardaparques de Coiba.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Allen, J. A. 1902. A preliminary study of the South American opossums of the genus *Didelphis* (Vol. 16). Knickerbocker Press.
- Allen, J. A. 1904. Mammals from southern Mexico and central and South America (Vol. 20). order of the Trustees, American Museum of Natural History.
- Barreto, E., Rangel, T. F., Pellissier, L., & Graham, C. H. 2021. Area, isolation and climate explain the diversity of mammals on islands worldwide. *Proceedings of the Royal Society B*, 288(1965), 20211879. <http://doi.org/10.1098/rspb.2021.1879>
- Beaugrand, G., Kléparski, L., Luczak, C., Goberville, E., & Kirby, R. R. 2024. A niche-based theory of island biogeography. *Ecology and Evolution*, 14(6), e11540.
- Blewett, C. M., Angehr, G. R., & de Pérez, I. O. 2021. Ecology, behavior, and vocalizations of the Coiba Spinetail (*Cranioleuca dissita*), a Panama endemic. *The Wilson Journal of Ornithology*, 133(1), 11-21.



- Bourlière, F. 1985. Primate communities: their structure and role in tropical ecosystems. *International Journal of Primatology*, 6(1), 1-26.
- Brown, N., & Escobar, L. E. 2023. A review of the diet of the common vampire bat (*Desmodus rotundus*) in the context of anthropogenic change. *Mammalian Biology*, 103(4), 433-453.
- Cronk, Q.C.B. 1997. Islands: stability, diversity, conservation. *Biodiversity and Conservation* 6, 477–493. <https://doi.org/10.1023/A:1018372910025>
- Garrido-Pérez, E. I., & Bastidas, N. M. M. 2025. De cárcel a patrimonio mundial: historia del impacto ambiental en la Isla Penal de Coiba, Panamá (1872-2023). *Revista Veritas de Difusão Científica*, 6(3), 4713-4748.
- González, P., Sawyer, Y. E., Avila, M., Armién, A. G., Armién, B., & Cook, J. A. 2010. Variation in cytochrome-b haplotypes suggests a new species of *Zygodontomys* (Rodentia: Cricetidae) endemic to Isla Coiba, Panama. *Zoologia (Curitiba)*, 27, 660-665.
- Goldman, E. A. 1920. *Mammals of Panama:(with Thirty-nine Plates)* (Vol. 2498). Smithsonian institution.
- Handley, C. O. 1981. Key to the bats of the lowlands of Panama. U.S. Natl. Mus. Washington, D.C. 17 p.
- Hortal, J., Triantis, K. A., Meiri, S., Thébault, E., & Sfenthourakis, S. 2009. Island species richness increases with habitat diversity. *The American Naturalist*, 174(6), E205-E217.
- Ibáñez, C., Pérez-Jordá, J., Juste, J., & Guillén, A. 1997. Los mamíferos terrestres del parque Nacional Coiba (Panamá). *Flora y fauna del Parque nacional de Coiba (Panamá)*, 469-484.
- Ibáñez, A. 2011. Guía botánica del Parque nacional Coiba. International Cooperative Biodiversity Groups (ICBG).
- Kallimanis, A. S., Mazaris, A. D., Tzanopoulos, J., Halley, J. M., Pantis, J. D., & Sgardelis, S. P. 2008. How does habitat diversity affect the species–area relationship?. *Global Ecology and Biogeography*, 17(4), 532-538.



- Kier, G., Kreft, H., Lee, T. M., Jetz, W., Ibis, P. L., Nowicki, C., ... & Barthlott, W. 2009. A global assessment of endemism and species richness across island and mainland regions. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 106(23), 9322-9327.
- Kisel, Y. & Barraclough, T.G. 2010. Speciation has a spatial scale that depends on levels of gene flow. *Am. Nat.* 175, 316-334. (doi:10.1086/650369)
- Lomolino, Mark V. 1990. "The Target Area Hypothesis: The Influence of Island Area on Immigration Rates of Non-Volant Mammals." *Oikos*, vol. 57, no. 3, 1990, pp. 297–300. JSTOR, <https://doi.org/10.2307/3565957>.
- Losos, J. & Schluter, D. 2000. Analysis of an evolutionary species–area relationship. *Nature* 408, 847–850. <https://doi.org/10.1038/35048558>
- MacArthur, R. H., & Wilson, E. O. 2001. *The theory of island biogeography* (Vol. 1). Princeton university press.
- Mendez-Carvajal, P.G. 2012. Population study of Coiba howler monkeys (*Alouatta coibensis coibensis*) and Coiba capuchin monkeys (*Cebus capucinus imitator*), Coiba Island National Park, Republic of Panama. *Journal of primatology*, 1(2), 104.
- Méndez-Carvajal, P.G. 2014. The Orion Camera System, a new method for deploying camera traps in tree canopy to study arboreal primates and other mammals: a case study in Panama. *Mesoamericana*, 18(1): 9-23.
- Méndez-Carvajal, P. G. 2019. An update on the Coiba howler monkey, Coiba Island, Panamá. *Neotropical Primates*, 25(1), 59-60.
- Olson, S.L. 2008. Falsified data associated with specimens of birds, mammals, and insects from the Veraguas Archipelago, Panama, collected by J. A. Batty. *American Museum Novitates* 3620: 1-37.
- Pérez, R., Condit, R., Aguilar, S., Hernández, A., & Villareal, A. 1996. Inventario de la vegetación de la isla de Coiba, Panamá: composición y florística. *Revista de Biología Tropical*, 44(1), 31-40.
- Queiroz de Oliveira, L. Q., Marciente, R., Magnusson, W. E., & Bobrowiec, P. E. D. 2015. Activity of the insectivorous bat *Pteronotus parnellii* relative to insect resources and vegetation structure. *Journal of Mammalogy*, 96(5), 1036-1044.



- Reid, F. 1997. A field guide to the mammals of Central America and Southeast Mexico. Oxford University Press.
- Ricklefs, R. E., & Lovette, I. J. 1999. The roles of island area per se and habitat diversity in the species–area relationships of four Lesser Antillean faunal groups. *Journal of Animal Ecology*, 68(6), 1142-1160.
- Mello, M. A. R., Schittini, G. M., Selig, P., & Bergallo, H. G. 2004. A test of the effects of climate and fruiting of Piper species (Piperaceae) on reproductive patterns of the bat *Carollia perspicillata* (Phyllostomidae). *Acta Chiropterologica*, 6(2), 309-318.
- Ross, C. & Reeve, N. 2011. Survey and census methods: population distribution and density [En línea]. En: J. Setchell y D. Curtis, eds., Field and laboratory methods in primatology. Disponible en: <https://books.google.com.pa>. [Consultado 23 jul 2025].
- Samudio, R., & Pino, J. 2005. Mamíferos Terrestres de Bahía Honda (Veraguas, Panamá). Consejo Superior de Investigaciones Científicas.
- Stein A, Gerstner K, Kreft H. 2014. Environmental heterogeneity as a universal driver of species richness across taxa, biomes and spatial scales. *Ecol. Lett.* 17, 866-880. (doi:10.1111/ele.12277) Crossref, PubMed, Web of Science, Google Scholar
- (doi:10.1111/ele.12277) Crossref, PubMed, Web of Science, Google Scholar
- Thomas, O. 1902. On some mammals from Coiba Island, off the west coast of Panama. *Novitates Zoologicae* 9: 135–137.
- Wilson, D. E., Cole, F. R., Nichols, J. D., Rudran, R., & Foster, M. S. 1996. Measuring and monitoring biological diversity: standard methods for mammals. *Measuring and monitoring biological diversity: Standard methods for mammals*, 27.





Estandarización de un proceso artesanal para la elaboración de vino de nance (*byrsonima crassifolia*): aplicación a bebidas fermentadas artesanales

Standardization of an artisanal process for the production of nance wine (*Byrsonima crassifolia*): application to artisanal fermented beverages

Edwar Tejedor

Universidad Tecnológica de Panamá, Centro Regional de Veraguas, Facultad de Ingeniería Industrial, Panamá.
edward.tejedor@utp.ac.pa <https://orcid.org/0009-0008-4327-0146>

Ismael García

Universidad Tecnológica de Panamá, Centro Regional de Veraguas, Facultad de Ingeniería Industrial, Panamá.
ismael.garcia2@utp.ac.pa <https://orcid.org/0009-0006-2028-6941>

Jesús Quiroz

Universidad Tecnológica de Panamá, Centro Regional de Veraguas, Facultad de Ingeniería Industrial, Panamá.
jesus.quiroz2@utp.ac.pa <https://orcid.org/0009-0000-9205-269X>

Rolando Mora De León

Universidad Tecnológica de Panamá, Centro Regional de Veraguas, Facultad de Ingeniería Industrial, Panamá.
rolando.mora@utp.ac.pa <https://orcid.org/0009-0007-3932-5485>

Fecha de recepción: 17 de marzo de 2026

Fecha de aceptación: 4 de mayo de 2026.

DOI: <https://doi.org/10.48204/j.tecno.v8n2.a10862>

RESUMEN

El presente estudio documentó y estandarizó un proceso artesanal de elaboración de vino de nance (*Byrsonima crassifolia*) desarrollado a pequeña escala, con el objetivo de transformar un conocimiento empírico en un procedimiento técnico reproducible. Se describió la secuencia de operaciones del proceso, incluyendo tiempos, proporciones y un balance de masa global por etapas, para facilitar su replicación bajo condiciones artesanales. El proceso tuvo una duración aproximada de 338 horas, siendo la fermentación alcohólica la etapa más prolongada, durante la cual se observó liberación de gas y sedimentación progresiva de sólidos, seguida de un trasiego que mejoró la claridad inicial del producto. Asimismo, se realizó una evaluación sensorial exploratoria con quince consumidores adultos no entrenados, quienes evaluaron aroma, sabor, color, apariencia y



aceptabilidad global mediante una escala hedónica de cinco puntos. Los resultados indicaron una aceptabilidad general favorable del vino de nance. Como limitaciones se identificaron la ausencia de mediciones fisicoquímicas y microbiológicas y la falta de un panel sensorial entrenado. Se concluyó que la estandarización del proceso aporta a la gestión del conocimiento en bebidas fermentadas artesanales.

PALABRAS CLAVE

Byrsonima crassifolia, enología artesanal, estandarización de procesos, fermentación alcohólica, vino de nance

ABSTRACT

This study documented and standardized an artisanal process for the production of nance wine (*Byrsonima crassifolia*) developed at a small scale, with the aim of transforming empirical knowledge into a reproducible technical procedure. The sequence of process operations was described, including processing times, proportions, and a global mass balance by stages, to facilitate replication under artisanal conditions. The process lasted approximately 338 hours, with alcoholic fermentation being the longest stage, during which gas release and progressive sedimentation of solids were observed, followed by a racking step that improved the initial clarity of the product. An exploratory sensory evaluation was also conducted with fifteen untrained adult consumers, who assessed aroma, flavor, color, appearance, and overall acceptability using a five-point hedonic scale. The results indicated a generally favorable acceptability of the nance wine. Identified limitations included the absence of physicochemical and microbiological measurements and the lack of a trained sensory panel. It was concluded that process standardization contributes to knowledge management in artisanal fermented beverages.

KEYWORDS

Byrsonima crassifolia, artisanal enology, process standardization, alcoholic fermentation, nance wine

INTRODUCCIÓN

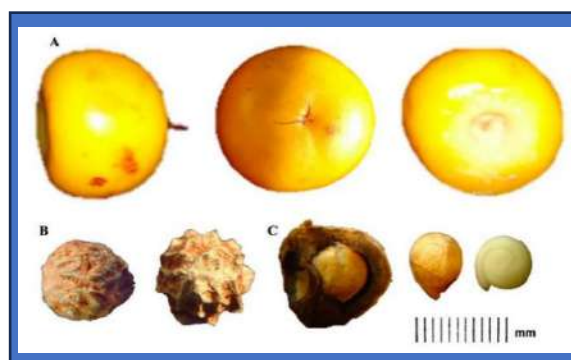
El nance (*Byrsonima crassifolia*), visto en la Figura 1, es un fruto tropical ampliamente distribuido en Centroamérica y regiones del Caribe, utilizado tradicionalmente en la elaboración de bebidas, dulces y productos fermentados de carácter artesanal. Desde el enfoque de la enología, disciplina científica que estudia la producción y transformación del vino (Moreno & Peinado, 2012), el aprovechamiento de frutas no convencionales representa una línea de creciente interés, particularmente en contextos tropicales, debido a su perfil nutricional y contenido de compuestos bioactivos (Batista, et al., 2025).

Investigaciones recientes han explorado la fermentación de frutas nativas mediante consorcios microbianos, reportando transformaciones sensoriales y bioquímicas relevantes en productos fermentados de bajo y moderado contenido alcohólico (Suhre, et al., 2025).

Figura 1

Fruto de nance. Fuente: (Maldonado Peralta, et al., 2020)





La literatura sobre fermentación de frutas tropicales muestra que numerosos estudios se han centrado en frutas como piña, mango, guayaba y maracuyá, abordando tanto procesos industriales como artesanales. No obstante, a pesar de su uso empírico y culturalmente arraigado, la disponibilidad de procedimientos técnicamente documentados y estandarizados para la elaboración de bebidas fermentadas a base de nance sigue siendo limitada, especialmente en contextos de producción a pequeña escala. Esta situación motiva la adopción de un enfoque aplicado orientado a la sistematización de un proceso artesanal existente (Maldonado Peralta, et al., 2020; Hernández-Martínez, et al., 2026).

Desde el enfoque de la investigación aplicada, la estandarización de procesos artesanales permite transformar conocimientos empíricos en procedimientos técnicamente documentados, contribuyendo a la reproducibilidad y transferencia del conocimiento. Por otra parte, la evaluación sensorial exploratoria es ampliamente utilizada en fases tempranas de desarrollo de alimentos, cuando el objetivo principal es obtener una apreciación preliminar de la aceptabilidad del producto y orientar futuras mejoras, siempre que se expliciten su alcance y limitaciones metodológicas.

En este contexto, el presente estudio tiene como objetivo documentar y estandarizar un proceso artesanal real de elaboración de vino de nance, así como presentar los resultados de una evaluación sensorial exploratoria, con el fin de generar una base técnica inicial que contribuya al conocimiento reproducible en un área emergente de investigación y sirva como referencia para estudios posteriores.

MATERIALES Y MÉTODOS

En concordancia con el objetivo planteado, el presente trabajo corresponde a un estudio descriptivo-aplicado, orientado a la documentación, sistematización y estandarización de un proceso artesanal existente para la elaboración de una bebida fermentada a base de nance. El enfoque metodológico se centró en la observación directa del proceso, el registro de las etapas y la sistematización de la experiencia práctica, sin empleo de grupo de control ni diseño experimental comparativo.

La materia prima principal correspondió aproximadamente a 1.0 kg de fruto maduro de nance. Como insumos complementarios se utilizaron agua potable, azúcar morena y levadura comercial para fermentación. Los envases empleados consistieron en recipientes plásticos y botellas de vidrio, previamente higienizados.

Descripción del proceso artesanal

El proceso artesanal de elaboración del vino de nance se estructuró en etapas consecutivas claramente definidas, con el propósito de asegurar su reproducibilidad a pequeña escala y minimizar variaciones que pudieran afectar el producto final. Durante el procedimiento se llevó un registro descriptivo de tiempos, observaciones visuales y cambios percibidos en el producto. Adicionalmente, se documentaron las etapas mediante material fotográfico. A continuación, se describen las etapas del proceso involucradas:

- **Selección y preparación de la materia prima.** Los frutos de nance maduros fueron seleccionados manualmente, descartando aquellos con daños visibles o signos de deterioro. Posteriormente, se realizó el lavado con agua potable para eliminar impurezas superficiales antes de su procesamiento.
- **Triturado manual.** Los frutos lavados se sometieron a triturado manual, evitando el uso de equipos mecánicos como licuadoras, con el fin de prevenir la ruptura de las semillas y la liberación de compuestos amargos. El triturado se efectuó de forma gradual hasta obtener una pulpa homogénea.
- **Extracción y colado del jugo.** La pulpa obtenida se mezcló con aproximadamente 0.2 L de agua potable a temperatura ambiente para facilitar la extracción del jugo. Posteriormente, se procedió al colado, separando el jugo de los sólidos gruesos (bagazo). El jugo obtenido constituyó la base del mosto.
- **Formulación y cocción del mosto.** El proceso de cocción se realizó en una olla de capacidad adecuada al volumen del jugo de nance obtenido. Para la formulación del mosto se adicionaron 3.3 L de agua, manteniendo la proporción establecida de 1.5 L de agua por cada libra de nance procesado. Posteriormente, se incorporó 0.08 kg de azúcar morena, añadida desde el inicio del calentamiento con el fin de asegurar su completa disolución y homogeneización en la mezcla. La cocción del mosto se llevó a cabo a fuego alto durante un periodo aproximado de 40 a 50 minutos, manteniendo



agitación constante para favorecer la integración de los componentes y evitar la caramelización localizada.

- **Enfriamiento e inoculación de la levadura.** Finalizada la cocción, el mosto fue retirado del fuego y dejado en enfriamiento natural hasta alcanzar temperatura ambiente. Una vez enfriado, se procedió a la inoculación de 5 g de levadura comercial, previamente rehidratada en una pequeña cantidad de agua a temperatura ambiente durante aproximadamente 5 minutos, con el fin de facilitar su incorporación homogénea al mosto.
- **Fermentación alcohólica.** El mosto inoculado se transfirió a recipientes de fermentación, preferentemente de vidrio, previamente higienizados. La fermentación alcohólica se desarrolló durante un periodo aproximado de dos semanas, durante el cual se observó la liberación de gas, atribuida al proceso fermentativo, y la formación progresiva de sedimentos. No se determinó experimentalmente la graduación alcohólica del vino obtenido, ni se efectuaron otras mediciones fisicoquímicas instrumentales, por lo que el seguimiento del proceso se limitó a observaciones visuales y temporales.
- **Trasiego y clarificación.** Concluido el periodo de fermentación, el vino joven fue sometido a trasiego mediante autosifón, con el objetivo de separar la fase líquida de los sedimentos depositados en el fondo del recipiente. Este procedimiento permitió mejorar la claridad visual del producto sin generar agitación excesiva ni incorporar oxígeno de forma significativa.

Balance de masa del proceso

Con el fin de cuantificar las principales corrientes de entrada y salida del proceso artesanal y apoyar su estandarización, se realizó un balance de masa global por etapas. El balance se construyó a partir de las cantidades de materia prima e insumos adicionados, así como de los volúmenes y masas observadas durante las distintas operaciones unitarias del proceso.

Las corrientes sólidas y líquidas asociadas al colado, fermentación y trasiego fueron cuantificadas mediante mediciones directas y estimaciones razonables acordes con el carácter artesanal del proceso. La liberación de dióxido de carbono (CO_2) durante la fermentación alcohólica no fue medida instrumentalmente, por lo que su contribución al balance de masa fue estimada a partir de la pérdida de masa observada y de consideraciones teóricas del proceso fermentativo.

El balance de masa fue expresado tanto en términos absolutos (kg y L) como porcentuales, normalizando cada etapa respecto a su corriente de entrada, de acuerdo con criterios comúnmente empleados en el análisis de procesos a pequeña escala.

Evaluación sensorial exploratoria



Se realizó una evaluación sensorial de carácter exploratorio con un panel de consumidores no entrenados, con el objetivo de obtener una apreciación preliminar de la aceptabilidad del vino de nance elaborado mediante el proceso artesanal estandarizado. Este enfoque es comúnmente empleado en etapas tempranas del desarrollo de productos alimentarios y bebidas fermentadas, cuando se busca una valoración global del agrado del producto y no una caracterización sensorial descriptiva avanzada (Lawless & Heymann, 2010; International Organization for Standardization, 2014).

La evaluación se llevó a cabo con un total de 15 participantes adultos, seleccionados por conveniencia. Los atributos sensoriales evaluados fueron aroma, sabor, color, apariencia y aceptabilidad global, conforme a criterios comúnmente empleados en estudios exploratorios de vinos y bebidas fermentadas de frutas (Lawless & Heymann, 2010; Leksrisompong, et al., 2012; Batista, et al., 2025). Cada atributo fue valorado de forma global mediante una escala ordinal de cinco puntos, donde 1 correspondió a “muy desagradable” y 5 a “muy agradable”.

Los resultados se analizaron mediante estadística descriptiva, calculando los promedios de las respuestas por atributo. No se aplicaron pruebas estadísticas inferenciales, en coherencia con el carácter exploratorio del estudio y el tamaño reducido de la muestra (International Organization for Standardization, 2014).

RESULTADOS

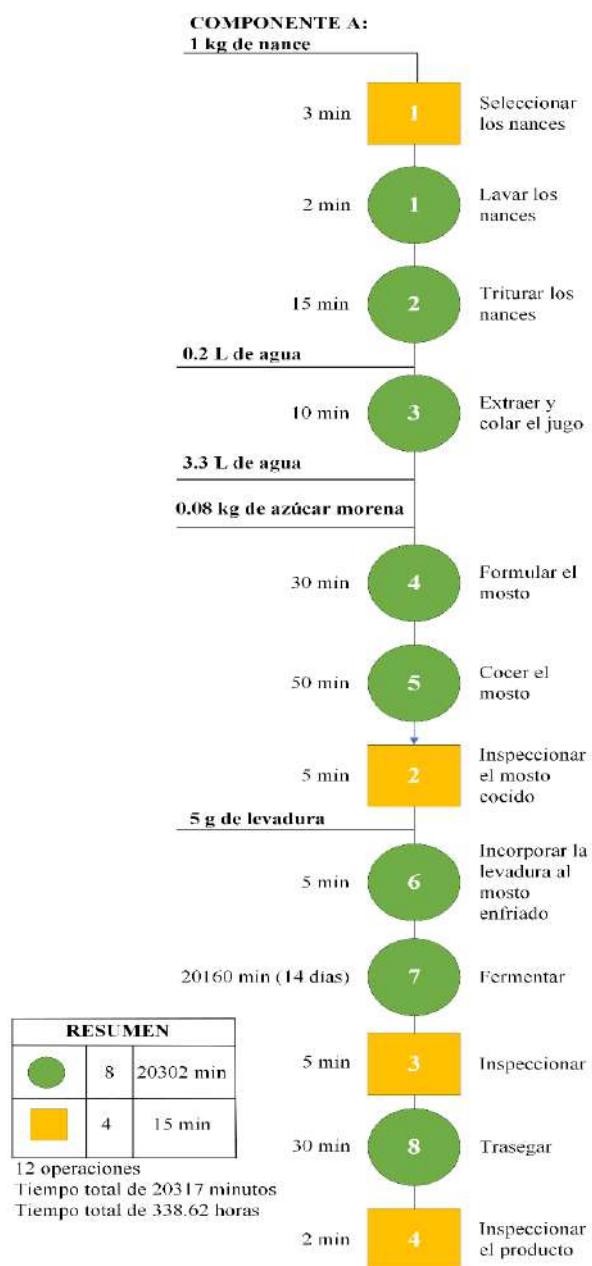
Comportamiento del proceso

El proceso artesanal realizado tuvo una duración aproximada de 338 horas, siendo la etapa de fermentación la que concentró la mayor parte del tiempo total del proceso. La Figura 2 presenta un cursograma sinóptico confeccionado a partir de la experiencia para visualizar las operaciones principales y su duración.

Figura 2



Cursograma sinóptico del proceso artesanal de elaboración de vino de nance.



Durante el desarrollo del proceso fermentativo se evidenció actividad visible asociada a la acción de la levadura, manifestada principalmente por la formación de burbujas de gas en la superficie del mosto durante los primeros días. A lo largo del periodo de fermentación, se observó una progresiva disminución de dicha actividad, acompañada por la sedimentación de sólidos finos en el fondo del recipiente.

Al finalizar aproximadamente las dos semanas de fermentación, el sistema presentó una clara diferenciación entre la fase líquida superior y los sedimentos inferiores. Este comportamiento correspondió a un proceso de fermentación alcohólica artesanal, caracterizado por la decantación natural de sólidos y la clarificación inicial del producto.

El trasiego mediante autosifón, observable en la Figura 3, permitió separar el vino joven de los sedimentos sin perturbar el fondo del recipiente, reduciendo la turbidez visible del líquido y obteniéndose un producto con mayor claridad visual. Este paso se identificó como crítico para la obtención de un vino más estable desde el punto de vista físico.

Figura 3

Trasiego del vino mediante autosifón y sedimentos. Fuente: elaboración propia.



Producto final

El producto final correspondió a un vino artesanal de nance, con coloración amarilla característica del fruto y un aroma frutal perceptible. El volumen obtenido fue aproximadamente de 0.75 L, equivalente al llenado de una botella tipo vino.

Tras el trasiego, el líquido presentó una menor presencia de partículas en suspensión, evidenciando una clarificación visual respecto al mosto fermentado inicial. No se registraron

signos visibles de contaminación durante el proceso, tales como olores desagradables, formación de mohos o turbidez anómala.

El vino obtenido se mantuvo estable visualmente en el corto plazo posterior al trasiego, bajo las condiciones artesanales del estudio. Las características observadas del producto final permiten describir el vino de nance obtenido como una bebida fermentada artesanal con atributos sensoriales definidos, susceptible de ser evaluada en etapas posteriores mediante análisis sensoriales más estructurados y determinaciones fisicoquímicas, fuera del alcance del presente estudio.

Balance de masa

Se realizó un balance de masa del proceso artesanal, mostrado en la Tabla 1 y de forma gráfica en la Figura 4.

Tabla 1.

Balance de masa del proceso artesanal de elaboración de vino de nance realizado. Elaboración propia.

PROCESO		Vino de nance		
		Entrada	Pérdidas	Producto transferido
P 1	Trituración			
	Nance (kg)	1.00	-	1.00
P 2	Extracción del jugo			
	Nance (kg)	-	-	1.00
	Agua (L)	0.20	-	-
P 3	Colado del jugo			
	Bagazo de nance (kg)	-	0.35	-
	Mosto (kg)	1.20	-	0.85
P 4	Formulación y cocción del mosto			
	Mosto (kg)	0.85	-	0.85
	Agua (L)	3.30	-	3.30
	Azúcar morena (kg)	0.08	-	0.08
P 5	Inoculación de la levadura			
	Mosto formulado (kg)	4.23	-	4.23
	Levadura (kg)	0.005	-	0.005
P 6	Fermentación			
	Mosto fermentable (kg)	4.235	0.10 (CO ₂)	4.135
P 7	Trasiego			
	Mosto fermentado (kg)	4.135	3.265	-
	Lías (kg)	-	0.12	-

PROCESO		Vino de nance		
		Entrada	Pérdidas	Producto transferido
	Trituración			
	Nance (%)	100	-	100
	Extracción del jugo			
	Nance (%)	-	-	100
	Agua (%)	100	-	-
	Colado del jugo			
	Bagazo de nance (%)	-	29.2	-
	Mosto (%)	100	-	70.8
	Formulación y cocción del mosto			
	Mosto (%)	100	-	100
	Agua	100	-	100
	Azúcar	100	-	100
	Inoculación de la levadura			
	Mosto formulado (%)	100	-	100
	Levadura	100	-	100
	Fermentación			
	Mosto fermentable (%)	100	2.36	97.6
	Trasiego			
	Mosto fermentado (%)	100	79.0	-
	Lías (%)	-	2.9	-

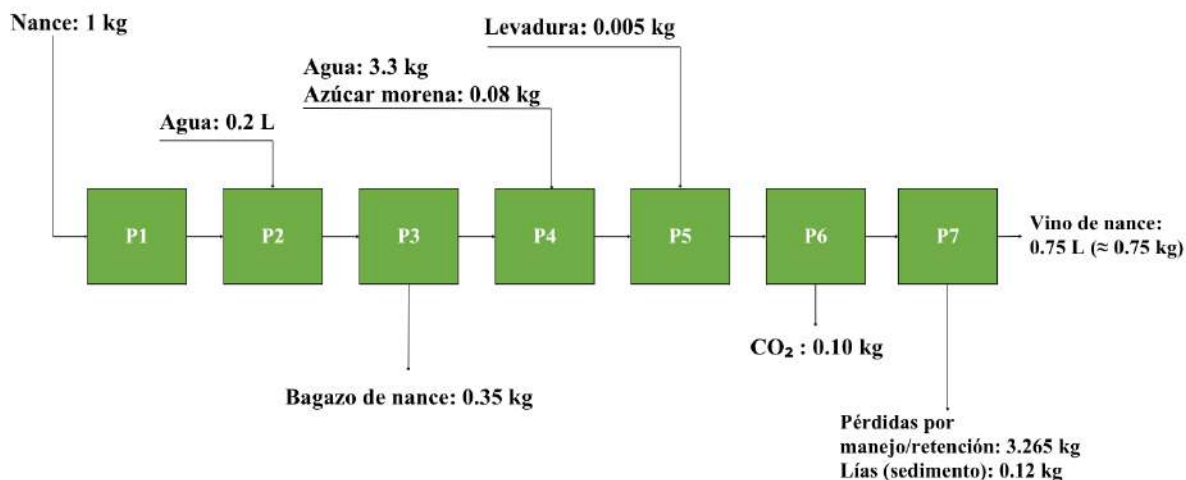


Vino de nance (L)	-	-	0.75	Vino de nance (%)	-	-	18.1
-------------------	---	---	------	-------------------	---	---	------

Observación: El mosto incluye jugo de nance más agua de extracción. La masa de CO₂ liberado durante la fermentación corresponde a una estimación basada en la pérdida de masa del sistema, debido a la ausencia de mediciones directas de gases.

Figura 4.

Diagrama de balance de masa por etapas del proceso artesanal de elaboración de vino de nance. Elaboración propia.



Las principales pérdidas de masa se asociaron a la etapa de formulación y cocción del mosto, debido a la evaporación de agua, así como a la fermentación alcohólica, donde se produjo liberación de dióxido de carbono (CO₂), considerada como una corriente de salida estimada. Durante el trasiego, la pérdida total del mosto fermentado correspondió a 81.9% (79.0% por manejo y retención de líquidos más 2.9% por lías), mientras que el producto transferido (vino) correspondió al 18.1%. Este comportamiento es característico de operaciones manuales desarrolladas a pequeña escala.

Adicionalmente, con base en el contenido promedio de sólidos solubles totales reportado para frutos de *Byrsonima crassifolia* (11.76 °Brix) y considerando la adición de 0.08 kg de azúcar morena al mosto, se estimó de manera indirecta una graduación alcohólica teórica del orden de 3.0 % v/v para el producto final. Para esta estimación, se asumió que 1.0 kg de nance aportó teóricamente 117.6 g de sólidos solubles, a los cuales se sumaron 80.0 g de azúcar



morena, obteniéndose un total aproximado de 197.6 g de azúcares fermentables. La conversión empleada, equivalente a 0.51 g de etanol por g de azúcar fermentable, corresponde al rendimiento teórico máximo derivado de la estequiometría de la fermentación alcohólica. Con base en esta relación, se obtuvo una producción potencial de 100.8 g de etanol, equivalente a 127.8 mL al considerar una densidad del etanol de 0.789

g/mL. Posteriormente, este volumen teórico de etanol se dividió entre el volumen total del mosto fermentable (4.235 L, es decir, 4235 mL) y se multiplicó por 100, obteniéndose una graduación alcohólica teórica cercana a 3.0 % v/v. No obstante, este valor debe interpretarse como una aproximación indirecta, ya que no se determinaron experimentalmente la densidad inicial, la densidad final ni el contenido real de azúcares fermentables recuperados del nance (Krishnan, et al., 1999; Maldonado Peralta, et al., 2020).

Evaluación sensorial

Los resultados de la evaluación sensorial exploratoria evidenciaron una aceptación general favorable del vino de nance. Los valores promedio obtenidos fueron 3.8 para aroma, 3.9 para sabor, 3.7 para color, 3.6 para apariencia y 3.8 para aceptabilidad global, en una escala de 1 a 5.

Todos los atributos se ubicaron por encima del valor central de la escala (3 = aceptable), indicando una percepción sensorial globalmente positiva del producto. El aroma y el sabor presentaron los valores promedio más elevados, mientras que el color y la apariencia, aunque ligeramente inferiores, se mantuvieron dentro del rango aceptable. Estos resultados sugieren un potencial sensorial inicial del vino desde el punto de vista del consumidor, si bien deben interpretarse como información descriptiva preliminar.

DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos indican que el proceso artesanal documentado es viable para la obtención de una bebida fermentada a base de nance bajo condiciones de pequeña escala. El comportamiento fermentativo observado concuerda con lo descrito en estudios recientes sobre fermentación de frutas tropicales y amazónicas, donde se reportan procesos similares de transformación bioquímica y desarrollo sensorial en bebidas fermentadas alternativas (Batista, et al., 2025; Suhre, et al., 2025). En particular, la observación de actividad fermentativa durante las primeras etapas del proceso, la formación progresiva de sedimentos y la clarificación lograda mediante trasiego son consistentes con patrones ampliamente documentados en fermentaciones artesanales de frutas.

Los resultados del balance de masa evidencian que el rendimiento obtenido en la elaboración del vino de nance refleja un comportamiento característico de procesos fermentativos artesanales desarrollados sin control instrumental de variables fisicoquímicas. En este



contexto, la graduación alcohólica del producto no fue determinada experimentalmente, por lo que se recurrió a una estimación teórica indirecta cercana a 3.0 % v/v, basada en valores reportados en la literatura y en las cantidades de insumos empleadas. Este valor debe interpretarse con cautela, ya que no deriva de una medición

instrumental directa. Por otra parte, los residuos sólidos observados durante el trasiego son consistentes con lo descrito en la literatura, donde estudios sobre la producción de vinos de frutas señalan que las etapas de clarificación y separación de sólidos influyen de forma significativa en el rendimiento final del proceso, especialmente en sistemas de pequeña escala y manejo artesanal (Velić, et al., 2018; Chetrariu, et al., 2025).

La estandarización de las etapas del proceso constituye el principal aporte del estudio, al transformar una práctica empírica en un procedimiento técnicamente documentado y reproducible. Este aporte adquiere mayor relevancia al considerar que la elaboración de bebidas fermentadas a partir de *Byrsonima crassifolia* representa un campo de investigación aún incipiente, con un número reducido de estudios científicos disponibles. En este sentido, el carácter emergente de esta línea de investigación puede interpretarse como una fortaleza del trabajo, ya que aporta evidencia preliminar y documentación técnica que pueden servir de referencia para investigaciones posteriores de mayor profundidad analítica. Este tipo de estandarización resulta especialmente relevante en el ámbito de la gestión del conocimiento, al facilitar la reproducibilidad del proceso y la transferencia de saberes asociados a productos alimentarios tradicionales o emergentes.

En cuanto a la evaluación sensorial, los resultados mostraron una aceptación general favorable, con valores promedio superiores al punto central de la escala utilizada, lo que sugiere un potencial sensorial inicial del vino de nance. Resultados comparables han sido reportados en estudios sobre bebidas fermentadas elaboradas a partir de frutas tropicales, incluso en ausencia de optimización fisicoquímica avanzada del proceso (Batista, et al., 2025; Suhre, et al., 2025). No obstante, la ausencia de un panel sensorial entrenado y el tamaño reducido de la muestra limitan el alcance de las conclusiones, por lo que los hallazgos deben interpretarse como evidencia descriptiva preliminar, de acuerdo con los criterios metodológicos establecidos para evaluaciones sensoriales exploratorias (International Organization for Standardization, 2014)

CONCLUSIONES

Los datos indican que es posible documentar y estandarizar de manera sistemática un proceso artesanal reproducible para la elaboración de vino de nance (*Byrsonima crassifolia*), transformando un conocimiento empírico en un procedimiento técnicamente estructurado. El balance de masa permitió identificar las principales corrientes de entrada, salida y pérdidas



del proceso, mientras que la estimación teórica indirecta de la graduación alcohólica aportó un referente preliminar para la caracterización del producto. En conjunto, estos resultados sugieren que el proceso presenta viabilidad técnica y un potencial sensorial inicial favorable, lo que respalda la pertinencia de continuar investigando el nance como materia prima para bebidas fermentadas mediante enfoques analíticos más integrales que fortalezcan la gestión del conocimiento en bebidas fermentadas artesanales.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece a Eduardo Muñoz por sus conocimientos y aportes técnicos en el ámbito de las bebidas fermentadas, los cuales contribuyeron al desarrollo del presente proyecto. Se agradece al Dr. Alexis Tejedor De León por la asesoría brindada durante el curso de Ciencias de los Materiales.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Batista, B. N., Correia, A. C., Jordão, A. M. & Albuquerque, P. M., 2025. Fermented Beverages from Amazonian Fruits: Nutritional Characteristics and Bioactive Compounds.

Beverages, 11(5), pp. 152, doi: 10.3390/beverages11050152.

Chetrariu, A. y otros, 2025. Sustainable Valorization of Wine Lees: From Waste to Value-Added Products. *Applied Sciences*, 15(7), pp. 3648, doi: 10.3390/app15073648.

Hernández-Martínez, D. M. y otros, 2026. Changes in Bioactive Characteristics of Nance (*Byrsonima crassifolia*) Pulp and Liqueur During Storage. *Beverages*, 12(1), pp. 17, doi: 10.3390/beverages12010017.

International Organization for Standardization, 2014. *ISO 11136:2014. Sensory analysis — Methodology — General guidance for conducting hedonic tests with consumers in a controlled area*, s.l.: ISO.

Krishnan, M. S., Ho, N. W. & Tsao, G. T., 1999. Fermentation kinetics of ethanol production from glucose and xylose by recombinant *Saccharomyces* 1400(pLNH33).

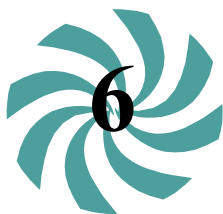
Applied biochemistry and biotechnology, Volumen 77-79, p. 373–388.

Lawless, H. T. & Heymann, H., 2010. *Sensory evaluation of food: Principles and practices*. Segunda ed. s.l.:Springer, doi: 10.1007/978-1-4419-6488-5.



- Leksrisompong, P. P., Lopetcharat, K., Guthrie, B. & Drake, M. A., 2012. Development of a sensory lexicon and application by an industry trade panel for fermented beverages. *Journal of Sensory Studies*, 27(4), pp. 247-263, doi: 10.1111/j.1745-459X.2012.00389.x.
- Maldonado Peralta, M. d. l. Á. y otros, 2020. Caracterización y evaluación de frutos de ‘nanche’ (*Byrsonima crassifolia* L.). *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 5 Febrero, 11(1), pp. 151-160, doi: 10.29312/remexca.v11i1.1950.
- Moreno, J. & Peinado, R., 2012. Chapter 11 - The Transformation of Must into Wine. En: *Enological Chemistry*. s.l.:Elsevier Inc., pp. 157-182, doi: 10.1016/B978-0-12-388438-1.00011-X.
- Suhre, T. y otros, 2025. Fermentation of native Brazilian fruits with kombucha: A novel opportunity for producing low-alcohol beverages. *Food Bioscience*, Volumen 65, pp. 106122, doi: 10.1016/j.fbio.2025.106122.
- Velić, D. y otros, 2018. The production of fruit wines – a review. *Croatian Journal of Food Science and Technology*, 10(2), pp. 279-290, doi: 10.17508/CJFST.2018.10.2.19.





Mapping the Cosmic Web: A Statistical Comparison of Filamentary Structure in SDSS and Simulated Galaxy Distributions

Mapecto de la red c3smica: comparaci3n estadística de la estructura filamentaria en SDSS y distribuciones de galaxias simuladas

Franklin Sim3n V3squez Guardia

Universidad de Panam3, Facultad de Ciencias Naturales y Exactas, Departamento de Físca, Panam3.

franklin-s.vasqywez-g@up.ac.pa

<https://orcid.org/0000-0002-1413-6617>

Fecha de recepci3n: 2 de febrero de 2026

Fecha de aceptaci3n: 4 de mayo de 2026

DOI: <https://doi.org/10.48204/j.tecno.v8n2.a10863>

ABSTRACT

We present a statistical analysis of large-scale filamentary structure using Sloan Digital Sky Survey (SDSS) data and synthetic cosmological simulations. A 112 630-galaxy catalog within the redshift range $0.06 < z < 0.09$ is used to construct a two-dimensional density field via angular binning and Gaussian smoothing, after which a morphology-based filament detection algorithm is applied.

To quantify filament strength, we define a percentile-based observable given by the 98th percentile of the filament intensity field. This procedure is applied consistently to both observational data and an ensemble of 10 000 simulated realizations, yielding a statistical distribution of threshold values. The observed threshold is compared to the simulation distribution using cumulative distribution functions and dispersion measures. We find that the SDSS value lies within the expected range, indicating statistical consistency with Λ CDM (Lambda Cold Dark Matter) cosmological models.

As a complementary analysis, we fix the filament intensity threshold to the observed value and measure the fraction of the field exceeding this threshold. The observed fraction lies toward the lower tail of the simulated distribution, suggesting a mild tendency toward less spatially extended high-intensity filamentary structures.

Finally, we discuss limitations related to survey geometry and the projection of the three-dimensional galaxy distribution onto a two-dimensional field, which can reduce the apparent contrast and spatial coherence of filamentary structures.



KEYWORDS

Large-scale structure, cosmic filaments, SDSS, density field, filament detection, percentile threshold, cosmological simulations, Λ CDM.

RESUMEN

Se presenta un análisis estadístico de la estructura filamentaria a gran escala del universo utilizando datos del Sloan Digital Sky Survey (SDSS) y simulaciones cosmológicas sintéticas. A partir de un catálogo de 112 630 galaxias en el intervalo $0.06 < z < 0.09$, se construye un campo de densidad bidimensional mediante binning angular y suavizado gaussiano, sobre el cual se aplica un algoritmo de detección de filamentos.

Para cuantificar la prominencia de las estructuras, se introduce un observable basado en percentiles, definido como el umbral correspondiente al percentil 98 del campo de intensidad filamentaria. Este procedimiento se replica en un conjunto de 10 000 realizaciones simuladas, generando una distribución estadística de umbrales comparables. El valor observado se contrasta con la distribución simulada mediante funciones de distribución acumulada y medidas de dispersión. Los resultados muestran que el umbral observado es consistente con el rango esperado de las simulaciones, indicando consistencia estadística con modelos cosmológicos tipo Λ CDM (materia oscura fría con constante cosmológica).

De manera complementaria, se analiza la fracción del campo que excede un umbral fijo definido por el valor observado. En este caso, la fracción medida se ubica hacia la cola inferior de la distribución simulada, sugiriendo una leve tendencia hacia estructuras filamentosas menos extendidas en los datos.

Finalmente, se discuten las limitaciones asociadas a la geometría observacional y a la proyección bidimensional del campo, las cuales pueden afectar la reconstrucción de la estructura tridimensional y reducir el contraste y la coherencia espacial de las estructuras filamentosas.

PALABRAS CLAVE

Estructura a gran escala, filamentos cósmicos, SDSS, campo de densidad, detección de filamentos, percentiles, simulaciones cosmológicas, Λ CDM

INTRODUCTION

The large-scale structure of the Universe emerges from the gravitational amplification of primordial density perturbations within an expanding spacetime (Peebles, 1980; Dodelson, 2003). In the standard cosmological framework, this evolution is described by the Λ CDM (Lambda Cold Dark Matter) model, in which the present-day energy density of the Universe is dominated by dark energy, followed by dark matter and baryonic matter, with observations indicating a spatially flat geometry (Planck Collaboration, 2018).

The origin of structure is traced back to the inflationary paradigm, which posits a phase of rapid exponential expansion in the early Universe. During this period, quantum fluctuations



were stretched to cosmological scales, generating nearly Gaussian and approximately scale-invariant perturbations (Mukhanov, 2005; Planck Collaboration, 2018). These fluctuations act as the seeds for structure formation and are commonly described in terms of a primordial power spectrum of the form

$$P(k) \propto k^{n_s}$$

where n_s is the scalar spectral index.

Although these initial conditions are well described by a Gaussian random field, the subsequent gravitational evolution of the Universe is inherently nonlinear. As density perturbations grow, gravitational collapse induces mode coupling and drives the system away from Gaussianity, leading to the formation of anisotropic and highly structured features such as filaments, sheets, and clusters (Bond, Kofman, & Pogosyan, 1996). As a result, the present-day matter distribution cannot be fully characterized by linear statistical descriptors alone. Nevertheless, the large-scale morphology of the cosmic web retains imprints of the initial conditions, providing a complementary means of probing the underlying cosmological model beyond the linear regime.

As structure evolves, matter organizes into the cosmic web, a network of voids, sheets, filaments, and clusters. Filaments, in particular, are elongated overdense structures that connect massive nodes such as galaxy clusters and serve as channels for matter accretion (Bond et al., 1996; Springel et al., 2005). Their geometry and spatial distribution encode information about both the primordial fluctuations and the nonlinear processes governing structure formation, making them a valuable probe of cosmology.

Observationally, the large-scale distribution of galaxies traces the underlying matter density field. Wide-field surveys such as the Sloan Digital Sky Survey (SDSS) have mapped millions of galaxies across large cosmological volumes, enabling detailed studies of the cosmic web (York et al., 2000). However, galaxies are not a direct representation of the total matter distribution, but rather biased tracers of it. The efficiency of galaxy formation depends on local environmental conditions, leading to a nontrivial relationship between galaxy number density and total matter density (Peebles, 1980). Despite this, galaxies remain a powerful observational probe, as their spatial distribution traces the gravitational potential wells dominated by dark matter.

An example of the large-scale galaxy distribution observed by SDSS is shown in Figure 1, where galaxies are plotted in right ascension–redshift space. The characteristic wedge-like geometry reflects both the survey footprint and the radial nature of redshift measurements, revealing filamentary patterns and large-scale clustering directly in observational data.



In this work, we focus on the statistical characterization of filamentary structure in a low-redshift slice of SDSS data ($0.06 < z < 0.09$). Building on the framework described above, we construct a two-dimensional density field from the observed galaxy distribution through angular binning and Gaussian smoothing and apply a morphology-based filament detection method to obtain a filament intensity map. Rather than identifying individual filaments as discrete objects, we adopt a field-based approach and define a scalar observable based on the upper percentile of the filament intensity distribution.

This observable is then compared with results obtained from synthetic universes generated using simplified Λ CDM-inspired models. By applying the same analysis pipeline to both observational data and simulated realizations, we assess whether the strength of filamentary structure in the observed Universe is statistically consistent with the model. This approach emphasizes real-space morphology and provides a complementary perspective to traditional analyses based on correlation functions or power spectra (Peacock, 1999).

THEORETICAL BACKGROUND AND METHODOLOGICAL FRAMEWORK

Cosmological Framework

The large-scale dynamics of the Universe are well described by the Friedmann–Lemaître–Robertson–Walker (FLRW) metric, which assumes spatial homogeneity and isotropy. In comoving coordinates, the metric takes the form

$$ds^2 = -c^2 dt^2 + a^2(t) \left[\frac{dr^2}{1 - kr^2} + r^2 d\Omega^2 \right],$$

where $a(t)$ is the scale factor, k characterizes the spatial curvature, and $d\Omega^2$ represents the angular component (Dodelson, 2003; Hogg, 1999).

Comoving coordinates are used to factor out the expansion of the Universe, allowing distances between objects to remain constant in the absence of peculiar motions and providing a convenient framework for describing structure formation.

The evolution of the scale factor is governed by the Friedmann equation,

$$H^2(a) = H_0^2 [\Omega_r a^{-4} + \Omega_m a^{-3} + \Omega_k a^{-2} + \Omega_\Lambda],$$

where $H(a)$ is the Hubble parameter accounting for expansion, H_0 is its present-day value, and Ω_r , Ω_m , Ω_k , and Ω_Λ denote the normalized density parameters corresponding to radiation, matter, spatial curvature, and dark energy, respectively (Peebles, 1980; Dodelson, 2003).

The curvature density parameter is defined as



$$\Omega_k = -\frac{kc^2}{a_0^2 H_0^2},$$

such that a flat Universe corresponds to $\Omega_k=0$, while positive or negative values indicate open or closed spatial geometries depending on the sign of k . Observational constraints from the cosmic microwave background are consistent with a nearly flat Universe (Planck Collaboration, 2018).

Within the Λ CDM framework, the present-day energy budget of the Universe can be approximated as

$$\Omega_\Lambda \approx 0.68, \quad \Omega_{\text{cdm}} \approx 0.27, \quad \Omega_b \approx 0.05, \quad \Omega_k \approx 0,$$

with the total matter density given by Ω_m in:

$$\Omega_m = \Omega_{\text{cdm}} + \Omega_b.$$

where Ω_{cdm} and Ω_b correspond to cold dark matter and baryonic matter, respectively.

Power Spectrum and Initial Conditions

Within the Λ CDM framework, baryonic matter constitutes the visible component traced by galaxies, while cold dark matter dominates the gravitational potential wells responsible for structure formation (Planck Collaboration, 2018).

The growth of structure is driven by gravitational instability acting on primordial density perturbations. These perturbations are conveniently described in terms of the density contrast

$$\delta(\mathbf{x}) = \frac{\rho(\mathbf{x}) - \bar{\rho}}{\bar{\rho}},$$

where $\rho(\mathbf{x})$ is the local matter density and $\bar{\rho}$ is the mean density of the Universe (Peebles, 1980).

In the linear regime, the statistical properties of the density field are fully characterized by the matter power spectrum $P(k)$, defined as the Fourier transform of the two-point correlation function. For a statistically homogeneous and isotropic field,

$$\langle \delta(\mathbf{k}) \delta^*(\mathbf{k}') \rangle = (2\pi)^3 \delta_D(\mathbf{k} - \mathbf{k}') P(k),$$

where $\delta(\mathbf{k})$ is the Fourier transform of the density contrast and δ_D is the Dirac delta function (Peacock, 1999).

The primordial power spectrum is commonly parameterized as a power law,



$$P(k) \propto k^{n_s},$$

where n_s is the scalar spectral index. Observations indicate that n_s is close to unity, corresponding to nearly scale-invariant fluctuations (Planck Collaboration, 2018). These initial perturbations grow under gravitational instability, eventually evolving into the nonlinear structures observed in the present-day Universe (Peebles, 1980; Dodelson, 2003).

Density Field Reconstruction and Smoothing

While the theoretical density field is continuous, observations provide only a discrete sampling of the underlying matter distribution through galaxies. Moreover, galaxies are biased tracers of the total matter field, reflecting the complex physics of galaxy formation (Peebles, 1980; Kaiser, 1984).

To approximate a continuous field, the observed galaxy distribution is converted into a density field through spatial binning. This process yields a discrete estimate of the density contrast, which serves as a proxy for the underlying matter distribution.

However, the resulting field is affected by shot noise due to the finite number of galaxies. To suppress these fluctuations and enhance coherent structures, a Gaussian smoothing filter is applied,

$$\delta_{\text{smooth}}(\mathbf{x}) = G_\sigma * \delta(\mathbf{x}),$$

where G_σ is a Gaussian kernel with characteristic scale σ . This operation reduces small-scale noise while preserving large-scale morphological features relevant to the cosmic web (Martínez & Saar, 2002)

The Cosmic Web and Filamentary Structure

As density perturbations evolve into the nonlinear regime, gravitational collapse proceeds anisotropically, leading to the formation of the cosmic web. This structure is characterized by a hierarchy of voids, sheets, filaments, and nodes, which emerge from collapse along one, two, or three spatial directions, respectively (Bond et al., 1996).

Filaments correspond to elongated overdense regions that connect massive nodes such as galaxy clusters. They act as channels for matter transport and play a central role in the assembly of large-scale structure. Because their geometry reflects both the initial conditions and the subsequent nonlinear evolution, filamentary structures provide a sensitive probe of cosmological models.

Filament Detection

To characterize filamentary structure, morphology-based detection methods operate on the smoothed density field to identify anisotropic features associated with elongated structures. These methods typically rely on local properties of the field, such as gradients, curvature, or



directional coherence, to distinguish filaments from isotropic overdensities and underdense regions.

Several well-established techniques have been developed to extract filamentary structures from cosmological data. For example, the Discrete Persistent Structures Extractor (DisPerSE) identifies filaments using topological persistence, tracing the skeleton of the density field through critical points and their connectivity (Sousbie, 2011). Alternatively, multiscale approaches such as the NEXUS and Multiscale Morphology Filter (MMF) methods classify structures based on the eigenvalues of the Hessian of the density field, enabling a scale-dependent identification of filaments, sheets, and clusters (Aragón-Calvo et al., 2007; Cautun et al., 2013).

Rather than explicitly implementing one of these discrete structure extraction algorithms, the approach adopted in this work follows a field-based methodology. Instead of identifying individual filaments as isolated objects, the method produces a continuous scalar field that encodes the degree of filamentarity at each point in the density field.

This representation allows for a statistical characterization of the filament network without requiring explicit segmentation or topological reconstruction. As a result, it facilitates direct comparison with theoretical models and simulated realizations through global observables derived from the filament intensity distribution.

OBSERVATIONAL DATA AND INSTRUMENTATION

The Sloan Digital Sky Survey

The observational data used in this work are drawn from the Sloan Digital Sky Survey (SDSS), one of the most extensive spectroscopic and photometric surveys of the sky. SDSS has mapped millions of galaxies over large cosmological volumes using a dedicated 2.5 meter telescope, providing precise measurements of angular positions and redshifts (York et al., 2000).

The survey operates in a drift-scan mode, covering large contiguous regions of the sky in a series of stripes. Spectroscopic observations provide redshift measurements, which allow the reconstruction of the three-dimensional distribution of galaxies. The resulting dataset forms a powerful probe of large-scale structure and the cosmic web.

An example of the SDSS galaxy distribution is shown in Figure 1, where galaxies are plotted in right ascension–redshift space. The characteristic wedge-shaped geometry reflects both the angular footprint of the survey and the radial nature of redshift measurements, with the two lobes corresponding to distinct survey regions.

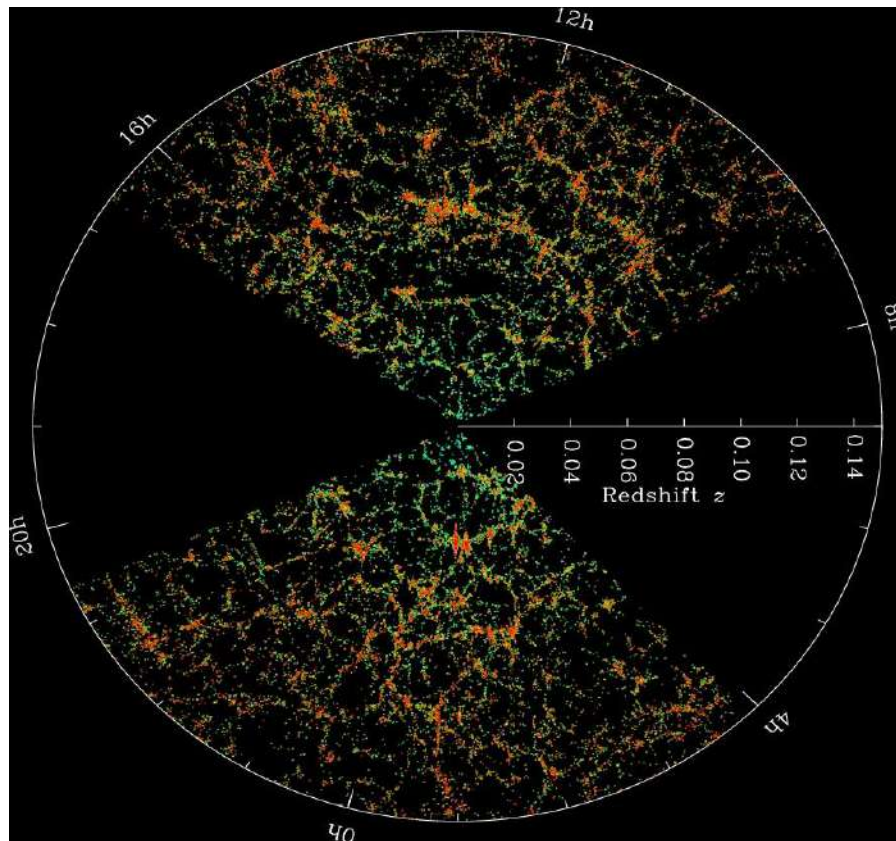


The survey provides photometric measurements in five optical bands (u, g, r, i, z) and spectroscopic data that yield redshift estimates for millions of galaxies. The combination of angular positions (right ascension and declination) with redshift information enables the reconstruction of the three-dimensional distribution of matter in the nearby Universe.

Figure 1

SDSS Survey Geometry in RA–Redshift Space

Visualization of the Sloan Digital Sky Survey (SDSS) galaxy distribution in right ascension and redshift, illustrating the characteristic wedge-shaped geometry of the survey footprint. The radial axis corresponds to redshift, which serves as a proxy for distance, while the angular coordinate traces sky coverage. Image credit: Sloan Digital Sky Survey (SDSS), retrieved from https://classic.sdss.org/includes/sideimages/sdss_pie2.php



Data Products and Selection

The data was obtained through the SDSS CasJobs interface, which provides SQL-based access to the survey database (Sloan Digital Sky Survey Collaboration, 2023). Each entry



provides the right ascension (RA), declination (Dec), and spectroscopic redshift z of individual galaxies.

In this analysis, we restrict the sample to a narrow redshift interval, $0.06 < z < 0.09$, corresponding to a relatively local volume of the Universe and a lookback time of approximately 0.8–1.2 Gyr in a standard Λ CDM cosmology. This selection balances the need for sufficient galaxy counts with the requirement of minimizing projection effects, ensuring that large-scale structures remain coherent within the slice.

The final dataset consists of 112,630 galaxies, providing a statistically robust sampling of the large-scale structure within this redshift range.

The spatial distribution of the selected galaxies is shown in Figure 2, where the SDSS data are displayed in right ascension–redshift coordinates. The characteristic wedge-shaped structure reflects both the survey geometry and the radial selection imposed by the redshift cut.

The combination of angular coordinates and redshift information allows the reconstruction of the three-dimensional spatial distribution of galaxies. By converting redshift into comoving distance under the assumed cosmological model, the galaxy catalog can be embedded in a three-dimensional coordinate system.

While the SDSS catalog provides angular positions and redshifts, physical interpretation of large-scale structure requires reconstructing the galaxy distribution in three-dimensional space.

To achieve this, redshift is converted into comoving distance, which represents a coordinate system that factors out the expansion of the Universe. In comoving coordinates, distances between objects remain fixed in the absence of peculiar velocities, allowing direct comparison of structures across cosmic time (Hogg, 1999).

The comoving radial distance $\chi(z)$ is computed as

$$\chi(z) = c \int_0^z \frac{dz'}{H(z')},$$

$$x = \chi(z) \cos(\delta) \cos(\alpha), y = \chi(z) \cos(\delta) \sin(\alpha), z = \chi(z) \sin(\delta),$$

where α and δ are the right ascension and declination, respectively.

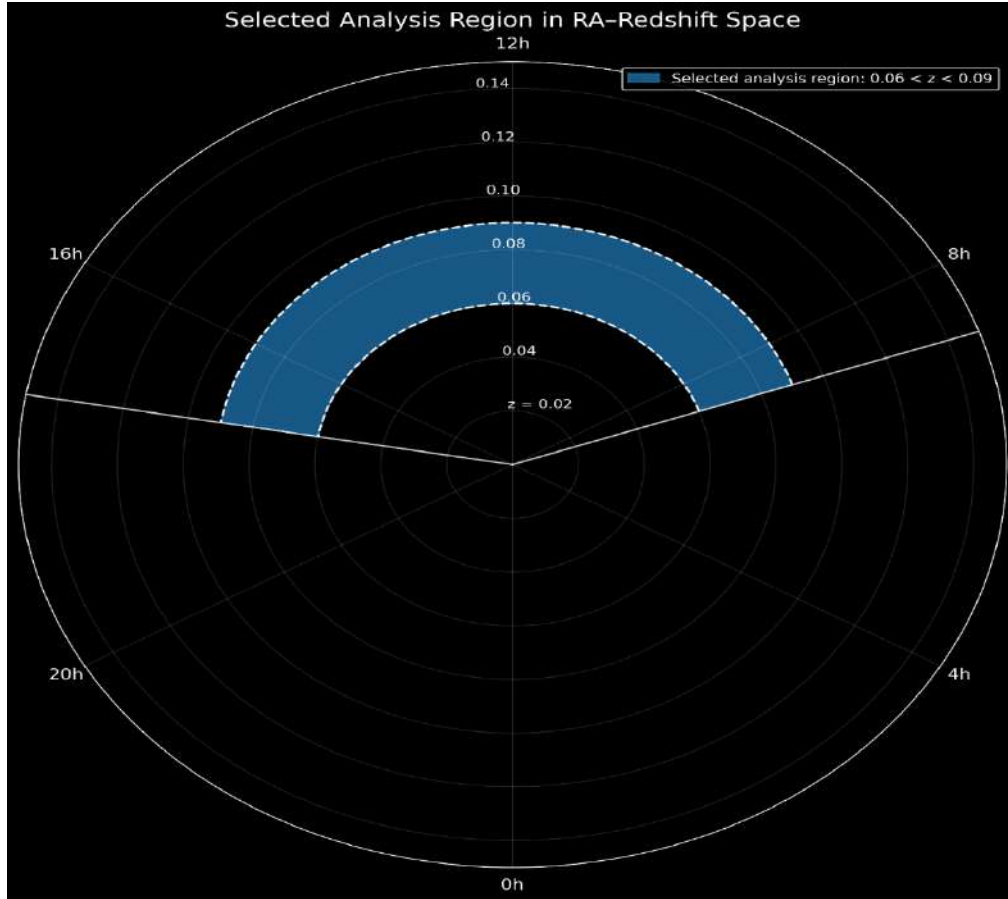
Figure 2

SDSS Galaxy Distribution in RA–Redshift Space

131



Distribution of galaxies in right ascension and redshift for the selected SDSS sample. The characteristic wedge-like geometry arises from the survey footprint combined with the applied redshift cut, defining the angular and radial boundaries of the analyzed volume.



The resulting three-dimensional distribution is shown in Figure 3, where the observer is located at the origin and the galaxy sample occupies a wedge-shaped volume extending outward in comoving space. The geometry reflects both the angular footprint of the survey and the imposed redshift limits.

The reconstruction is performed in comoving coordinates, which factor out the expansion of the Universe and provide a physically meaningful spatial framework. It should be noted, however, that the distances are inferred from redshift measurements and therefore include distortions due to peculiar velocities. Furthermore, while this representation provides useful

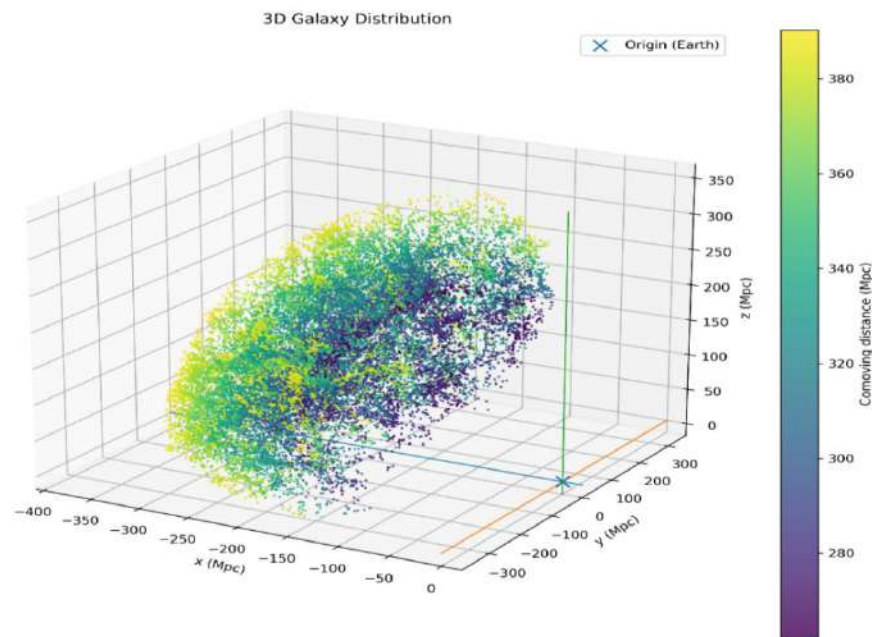
visualization of the galaxy distribution, the filament analysis itself is performed on a projected two-dimensional density field.

This representation highlights the filamentary nature of the galaxy distribution in three dimensions and provides a useful framework for interpreting large-scale structure.

Figure 3

Three-Dimensional Galaxy Distribution

Three-dimensional reconstruction of the galaxy distribution in comoving coordinates. The observer is located at the origin, and the data occupy a wedge-shaped volume determined by the survey footprint and redshift limits.



Survey Footprint and Observational Geometry

Due to the drift-scan observing strategy of SDSS, the survey footprint is not rectangular but instead follows curved stripes on the celestial sphere. When projected onto right ascension and declination coordinates, this results in a non-uniform, irregularly shaped observational region.

In the context of this analysis, regions of the sky outside the survey coverage contain no data and must be explicitly masked. This is achieved by constructing a footprint mask derived

from the observed galaxy distribution, ensuring that subsequent analysis steps operate only within the valid observational domain.

This masking procedure is essential to avoid artificial features arising from empty regions and to ensure that both observational data and simulated fields are treated consistently when applying the analysis pipeline.

Computational Tools and Data Handling

The analysis pipeline is implemented in Python (Python Software Foundation, 2023) using standard scientific computing libraries. Numerical operations and array manipulation are performed using NumPy (Harris et al., 2020), while visualization is handled with Matplotlib (Hunter, 2007). The construction and smoothing of the density field rely on functions from SciPy, particularly for Gaussian filtering (Virtanen et al., 2020).

Custom scripts are used to process the SDSS catalog, construct density fields, and apply filament detection methods. These tools enable efficient handling of large datasets and ensure reproducibility of the analysis across both observational and simulated data.

METHODOLOGY

Overview of the Analysis Pipeline

The methodology developed in this work aims to quantify filamentary structure in galaxy surveys through a reproducible and statistically interpretable pipeline. The approach consists of four main stages: (i) construction of a two-dimensional density field from the galaxy catalog, (ii) smoothing of the field to suppress shot noise, (iii) extraction of a filament intensity field, and (iv) definition of a percentile-based observable used for comparison with simulations.

Rather than identifying individual filaments as discrete objects, the analysis adopts a field-based approach, in which filamentary structure is encoded in a continuous scalar field. This enables a statistical characterization of the cosmic web and facilitates direct comparison between observational data and synthetic realizations.

Construction of the Density Field

The starting point of the analysis is the discrete distribution of galaxies in angular coordinates. To obtain a discretized approximation to the continuous matter distribution, the galaxy positions are projected onto a two-dimensional grid in right ascension and declination.

This is achieved by binning the galaxy sample into a regular grid of $N \times N$ cells, where each cell counts the number of galaxies falling within its angular boundaries. The resulting map can be expressed as



$$H(\alpha, \delta) = \sum_{i=1}^{N_{\text{gal}}} \mathcal{W}_i(\alpha, \delta),$$

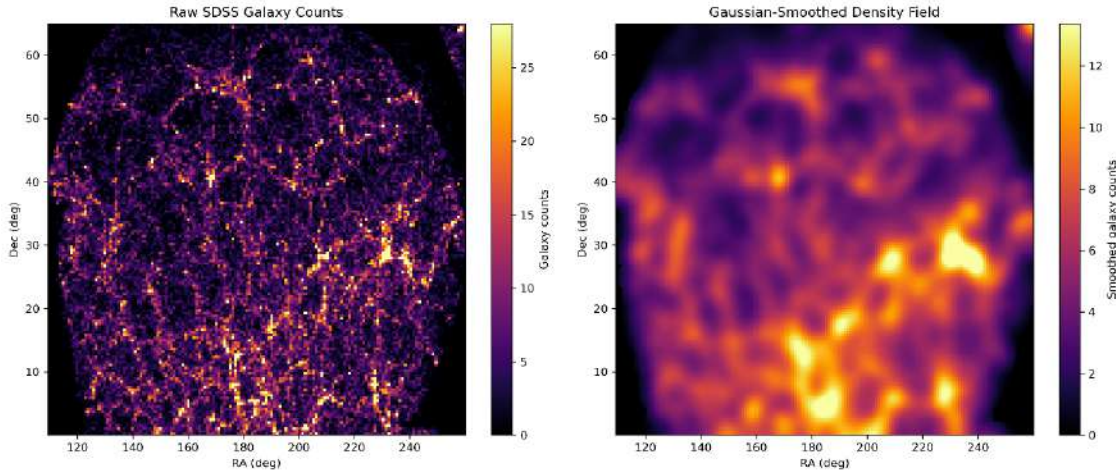
where $\mathcal{W}_i(\alpha, \delta)$ is a window function that assigns each galaxy to the corresponding grid cell. In practice, this corresponds to constructing a two-dimensional histogram of galaxy positions. The resulting field represents the raw projected galaxy density, where α and δ denote right ascension and declination, respectively.

This procedure converts the discrete galaxy catalog into a pixelized density field, enabling subsequent analysis using image-based and statistical techniques. The resulting raw density map, together with its Gaussian-smoothed counterpart, is shown in Figure 4.

Figure 4

Raw and Smoothed Galaxy Density Fields

Left: raw binned galaxy counts in RA–Dec space. Right: Gaussian-smoothed density field highlighting large-scale structure. The smoothing suppresses shot noise and reveals coherent filamentary features.



Density Contrast and Gaussian Smoothing

The raw density field is affected by shot noise due to the discrete nature of galaxy sampling. To suppress small-scale fluctuations and enhance coherent large-scale structures, the density field is smoothed using a Gaussian kernel.

The smoothed density field is defined as

$$H_{\text{smooth}}(\alpha, \delta) = G_{\sigma} * H(\alpha, \delta),$$

where G_σ is a Gaussian kernel with standard deviation σ , and $*$ denotes convolution (Martínez & Saar, 2002).

The choice of σ sets the characteristic scale of the structures being probed. Larger values of σ emphasize extended structures such as filaments and clusters, while smaller values retain finer details but are more sensitive to noise.

This smoothing step is essential for revealing the continuous morphology of the cosmic web and provides the input for filament detection. In particular, it ensures that the analysis focuses on physically meaningful, extended structures rather than fluctuations induced by discrete sampling.

Survey Mask and Valid Analysis Region

The SDSS observational footprint does not cover a contiguous rectangular region of the sky, but instead follows a complex geometry determined by the survey scanning strategy (York et al., 2000). As a result, the projected density field contains regions with no data corresponding to areas outside the survey coverage.

To ensure that the analysis is restricted to physically meaningful regions, a survey mask is constructed directly from the observed galaxy distribution. This is achieved by identifying pixels in the raw density field that contain galaxy counts and expanding this footprint slightly using a low-level smoothing operation. The resulting mask defines a valid analysis region, excluding empty areas where no observational data are available.

Formally, the mask is represented as a binary field,

$$M(\alpha, \delta) = \begin{cases} 1, & \text{if the pixel belongs to the observed footprint} \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}$$

All subsequent quantities, including the smoothed density field and filament intensity map, are evaluated only within this valid region. Pixels outside the mask are excluded from statistical calculations and are treated as undefined in visual representations.

This masking procedure is essential to prevent artificial structures from appearing at the boundaries of the survey and to ensure a consistent comparison between observational data and simulated realizations. The same masking procedure is applied to both datasets to maintain statistical consistency.

Filament Intensity Field

The smoothed density field provides a continuous representation of the large-scale matter distribution, but does not directly isolate filamentary structures. To extract these features, a morphology-based filament detection algorithm is applied to the smoothed field.



This procedure produces a scalar field,

$$f_{\text{map}}(\alpha, \delta),$$

referred to as the *filament intensity map*, which assigns to each pixel a value representing the degree to which the local environment resembles a filamentary structure. High values of f_{map} correspond to elongated, ridge-like features connecting overdense regions, while low values indicate voids or more isotropic environments (Bond, Kofman, & Pogosyan, 1996). Unlike methods that identify individual filaments as discrete objects, this approach treats filamentarity as a continuous field. This allows for a statistical characterization of the cosmic web without requiring explicit segmentation or topological classification of structures.

The filament intensity field therefore encodes the morphological information of the density field in a form suitable for defining global statistical observables, which are introduced in the following section.

This field-based representation differs from discrete skeleton-based methods such as DisPerSE, which explicitly reconstruct the filamentary network through topological analysis of critical points and their connectivity (Sousbie, 2011), as well as multiscale approaches such as NEXUS/MMF, which classify structures using the eigenvalues of the density field Hessian across multiple spatial scales (Cautun et al., 2013). Nevertheless, the continuous formulation adopted here retains sensitivity to filamentary morphology while enabling a straightforward statistical treatment of the resulting field.

Percentile-Based Filament Observable

To quantify the filamentary structure of the cosmic web in a manner that is both robust and comparable across datasets, we define a scalar observable based on the distribution of filament intensities.

Given the filament intensity field $f_{\text{map}}(\alpha, \delta)$, we consider its statistical distribution within the valid survey region defined by the mask $M(\alpha, \delta)$. Rather than selecting structures using an absolute threshold, which would depend sensitively on normalization and smoothing scale, we adopt a percentile-based approach.

Specifically, we define the threshold value

$$T_{98} = P_{98}(f_{\text{map}}),$$



where P_{98} denotes the 98th percentile of the filament intensity distribution evaluated over all pixels satisfying $M=1$. This definition ensures that the threshold is determined relative to the intrinsic distribution of filament strengths in the field.

A corresponding binary filament map is then constructed as

$$f_{\text{binary}}(\alpha, \delta) = \begin{cases} 1, & f_{\text{map}}(\alpha, \delta) > T_{98} \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}$$

which isolates the regions associated with the highest filament intensities.

The percentile thresholding procedure is illustrated in Figure 5, where the filament intensity field is shown together with the contour corresponding to the 98th percentile. This contour delineates the regions selected as significant filamentary structures and defines the subset of the field used in the construction of the binary filament map.

The quantity T_{98} itself is treated as the primary observable of this work. It encodes the characteristic strength of the most prominent filamentary structures in the field and provides a scalar measure that can be directly compared between observational data and simulated realizations.

By construction, this approach avoids arbitrary threshold choices and is insensitive to overall normalization differences, making it particularly well suited for statistical comparisons across datasets with different sampling properties.

It is important to emphasize that, by construction, the fraction of pixels identified as filamentary is fixed by the percentile definition. As a result, the filament fraction does not constitute an independent observable in this framework. Instead, the physically meaningful quantity is the threshold value T_{98} itself, which encodes the relative intensity required to isolate the most prominent filamentary structures within the field.

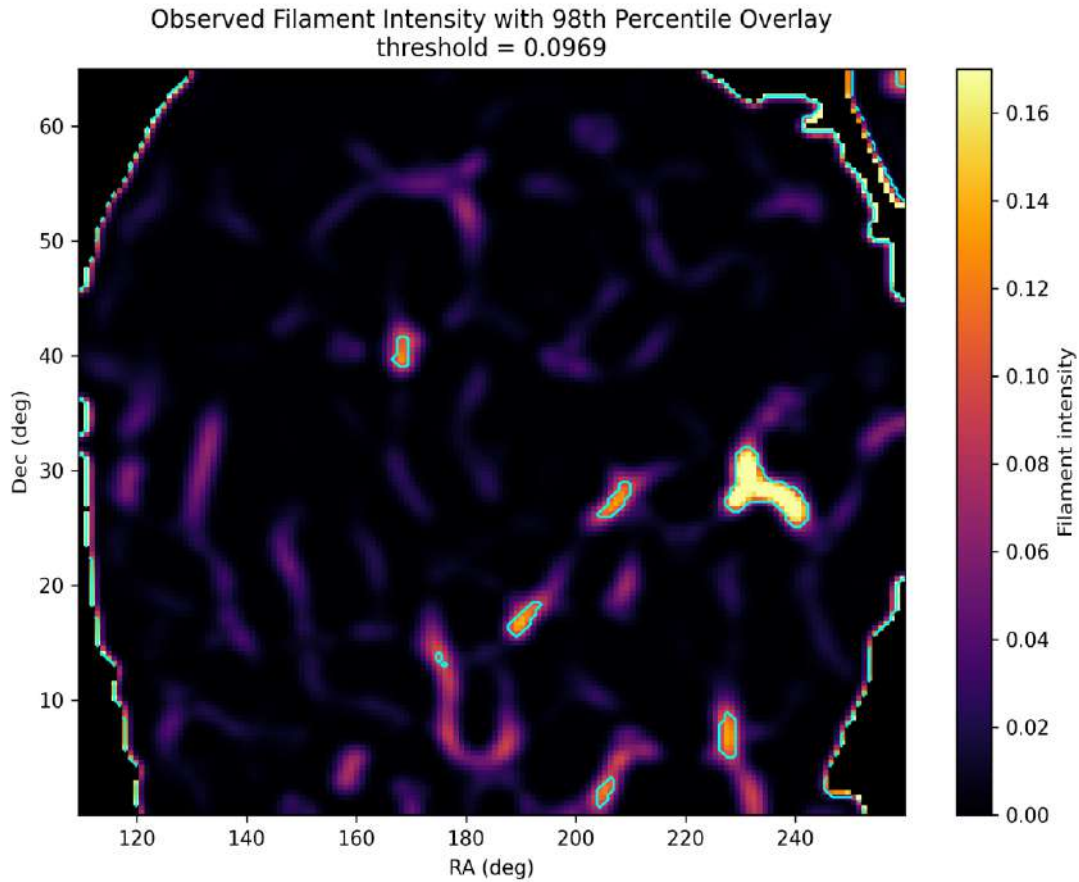
It is useful to emphasize that the percentile-based threshold and the fixed-threshold fraction probe complementary aspects of filamentary structure. The percentile threshold T_{98} is primarily sensitive to the upper tail of the filament intensity distribution and therefore reflects the characteristic strength of the most prominent filamentary features. In contrast, the fixed-threshold filament fraction probes the spatial extent and connectivity of these structures, providing a measure of how widespread high-intensity filamentary regions are within the field.

Figure 5



Filament Intensity Field with 98th Percentile Threshold Overlay

Filament intensity map derived from the smoothed density field, with contours indicating the 98th percentile threshold. The contour delineates the regions classified as high-significance filamentary structures and defines the corresponding binary filament selection. The filament intensity is a dimensionless quantity derived from the morphology of the smoothed density field, encoding the degree of filamentary structure at each location.



Simulation Pipeline and Statistical Comparison

To interpret the observational measurement of filamentary structure, we construct an ensemble of synthetic density fields designed to approximate the statistical properties of large-scale structure within a simplified Λ CDM-inspired framework.

The simulations are based on stochastic realizations of the density field, generated from an underlying power spectrum characterized by an effective spectral parameter n_s and a characteristic scale parameter k_0 . In this work, these parameters are treated as

phenomenological inputs controlling the large-scale clustering behavior of the field, rather than direct measurements of the physical primordial power spectrum.

In the simulations presented in this work, the effective spectral parameter and characteristic scale were set to $n_s = 0.15$ and $k_0 = 0.05$, respectively. These values were selected to reproduce the large-scale clustering behavior observed in the SDSS data at a qualitative level, ensuring that the simulated density fields exhibit comparable visual and statistical properties.

While these parameters are not intended to represent precise cosmological measurements, their values define the statistical baseline against which the observational data are compared and are therefore reported here to ensure reproducibility of the analysis.

The initial density field is modeled using Gaussian or lognormal statistics. Gaussian random fields provide a natural description of the linear regime of structure formation, where density fluctuations are small and statistically homogeneous (Peacock, 1999).

However, the evolved matter distribution exhibits significant non-Gaussian features due to nonlinear gravitational collapse. To approximate this behavior, lognormal transformations are often employed as a simple extension that captures the skewness of the density field while preserving its large-scale correlations (Coles & Jones, 1991).

To produce realistic galaxy distributions, additional observational effects are incorporated into the simulations. First, a linear galaxy bias parameter is introduced to account for the fact that galaxies trace the underlying matter density field in a nontrivial way (Peebles, 1980). Second, Poisson sampling is applied to convert the continuous density field into a discrete galaxy distribution, mimicking the stochastic nature of galaxy counts.

Further observational realism is introduced through a completeness factor, which models the finite detection efficiency of the survey, and a redshift-space distortion (RSD) proxy, implemented as a Gaussian perturbation along the line of sight to approximate the impact of peculiar velocities on observed redshifts (Hamilton, 1998).

Each simulated realization is constructed to match the number of galaxies in the observational dataset, ensuring a consistent level of sampling. The resulting simulated catalogs are then projected onto the same angular grid used for the SDSS data, and the full analysis pipeline, including density field construction, smoothing, masking, filament detection, and percentile thresholding, is applied identically to both observational and simulated datasets.

It is important to emphasize that the parameter n_s used in this context should be interpreted as an effective spectral-tilt parameter within a simplified two-dimensional model, rather than a direct representation of the physical scalar spectral index inferred from cosmological



observations (Planck Collaboration, 2018). Accordingly, the simulated fields should not be interpreted as full physical realizations of Λ CDM cosmology, but rather as controlled stochastic models designed to reproduce key statistical properties of large-scale structure.

The goal of this approach is to provide a consistent statistical baseline for comparison with observational data, rather than a detailed dynamical model of structure formation.

To illustrate the outcome of this procedure, a representative simulated realization is shown in Figure 6, where the filament intensity field is displayed together with the contour corresponding to the 98th percentile threshold. This visualization demonstrates how the same analysis pipeline applied to the observational data produces comparable filamentary structures in the simulated field, allowing for a direct statistical comparison between the two.

This representative realization provides a visual reference for interpreting the statistical distribution of filament strength discussed in the following section.

It is important to emphasize that the goal of this simulation framework is not to reproduce the full nonlinear dynamics of structure formation, as achieved in high-resolution N-body simulations, but rather to provide a statistically controlled baseline for testing morphology-based observables.

In this context, the use of Gaussian and lognormal fields is justified by their ability to reproduce key statistical properties of large-scale structure, including clustering behavior and density contrast distributions, at the scales probed in this work. For the relatively narrow redshift interval considered ($0.06 < z < 0.09$), where the analysis focuses on large-scale projected morphology rather than detailed halo dynamics, this approach provides a computationally efficient and physically motivated proxy.

Accordingly, the comparison performed here should be interpreted as a validation of the statistical methodology used to quantify filamentary structure, rather than a direct test of Λ CDM predictions at the level of full dynamical simulations.

Different choices of these parameters are not expected to qualitatively alter the main conclusions of the statistical comparison, as the analysis focuses on relative statistical properties rather than the absolute calibration of the model.

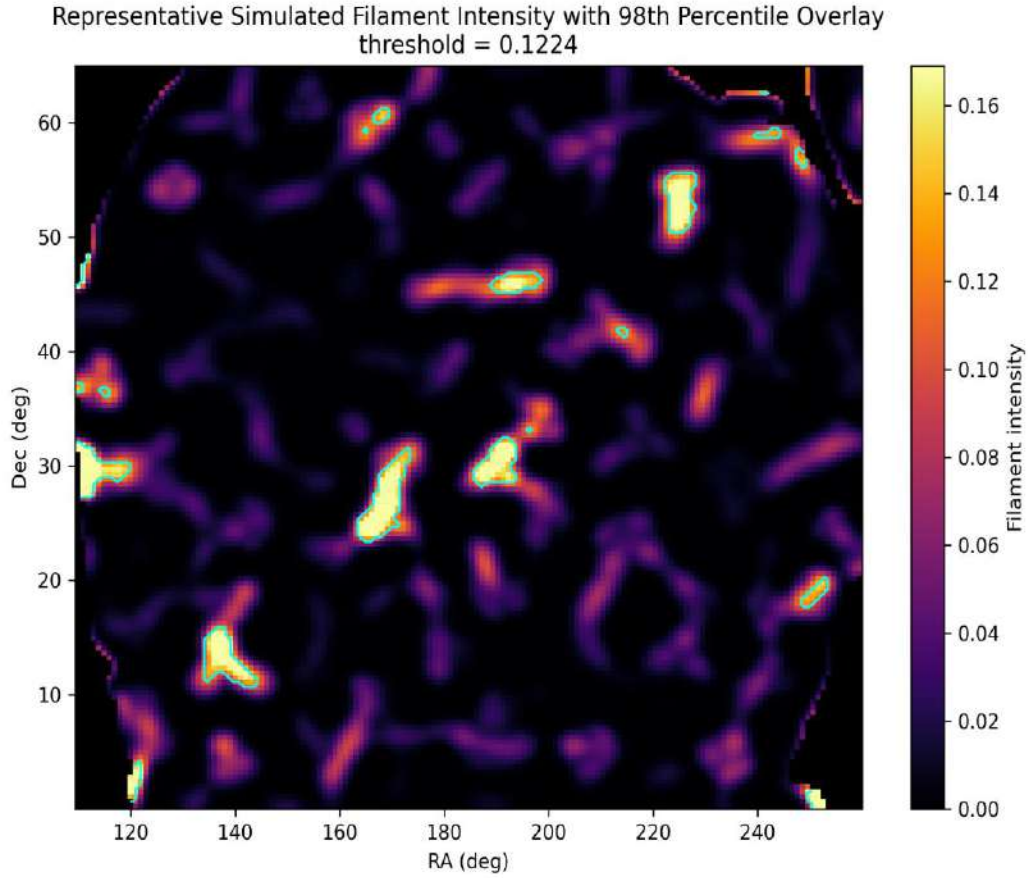
Figure 6

Representative Simulated Filament Intensity Field with 98th Percentile Threshold
Filament intensity map derived from a simulated realization, shown together with the contour corresponding to the 98th percentile threshold. Regions enclosed by the contour indicate the most significant filamentary structures selected by the percentile-based criterion. The same

141



analysis pipeline applied to the observational data is used, ensuring consistency in the definition of the filament observable.



Fixed-Threshold Filament Fraction Analysis

In addition to the percentile-based observable defined in the previous sections, a complementary analysis is performed by fixing the filament intensity threshold to the value measured in the observational data. In this formulation, the observable is defined as the fraction of the field exceeding a fixed intensity threshold,

$$F(T_{\text{obs}}) = \frac{N(f_{\text{map}} > T_{\text{obs}})}{N_{\text{total}}},$$

where T_{obs} corresponds to the 98th percentile of the SDSS filament intensity field.

Unlike the percentile-based approach, where the filament fraction is fixed by construction, the fixed-threshold observable allows the spatial extent of filamentary regions to vary across realizations. It therefore provides an independent measure of how widespread high-intensity filamentary structures are under a fixed physical criterion. However, in contrast to the percentile-based observable, it is also sensitive to the normalization and smoothing scale of the filament intensity field.

The regions selected by this threshold in the SDSS data are shown in Figure 7, where pixels exceeding $T_{\text{obs}}=0.0969$ are highlighted. These regions define the observed filament fraction used in the subsequent statistical comparison.

The same fixed threshold is then applied to each simulated realization, and the corresponding filament fraction is computed using an identical analysis pipeline. This ensures a consistent comparison between observational data and simulations.

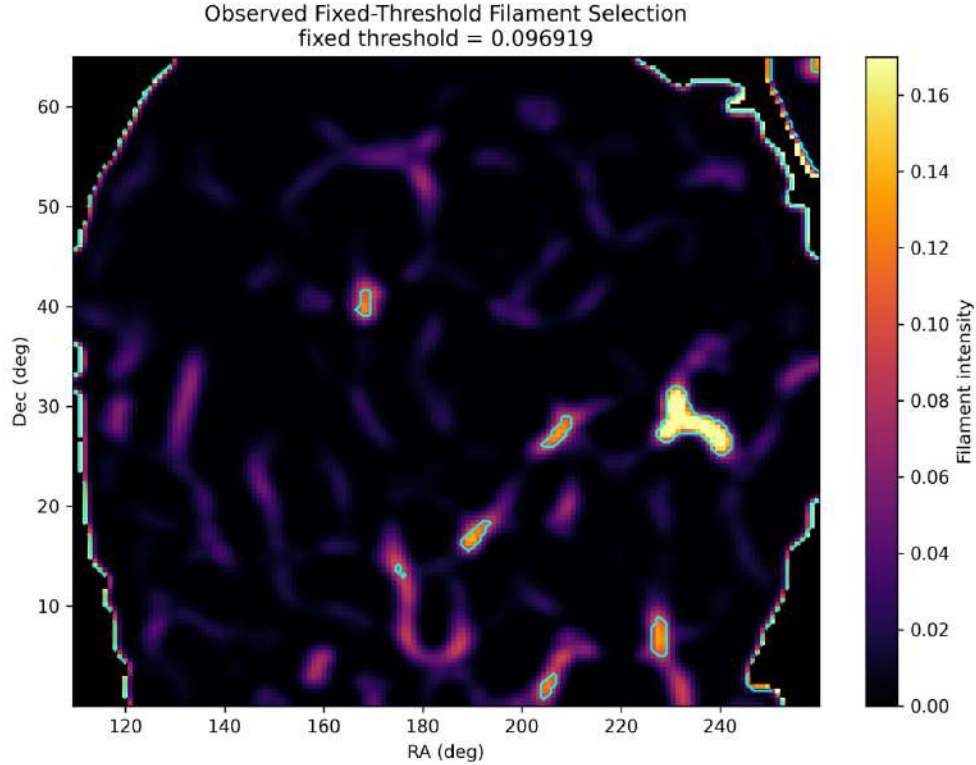
Taken together, the percentile-based and fixed-threshold approaches provide two complementary characterizations of filamentary structure. While the former defines filaments through a fixed fraction of the highest-intensity regions, the latter fixes the intensity scale and allows the spatial extent of filaments to vary. This dual formulation enables a direct comparison between the strength and spatial coverage of filamentary structures in both observational data and simulations.



Figure 7

Fixed-Threshold Filament Selection in SDSS Data

Filament intensity map derived from the SDSS galaxy sample within the redshift range $0.06 < z < 0.09$. Regions exceeding the fixed intensity threshold $T_{\text{obs}} = 0.0969$ are highlighted, corresponding to the value obtained from the 98th percentile of the observed filament intensity field. These regions define the filament fraction $F(T_{\text{obs}})$, representing the spatial extent of high-intensity filamentary structures under a fixed threshold criterion.



RESULTS

The statistical properties of the filament intensity threshold T_{98} are characterized using an ensemble of simulated realizations processed through the same analysis pipeline as the observational data. This enables a direct comparison between the observed SDSS value and the distribution expected under the adopted model. Histograms are constructed using a fixed binning scheme to enable consistent visual comparison across different observables.

The distribution of T_{98} values obtained from the simulations is shown in Figure 8. Each value corresponds to the 98th percentile of the filament intensity field in an individual realization. The resulting distribution spans a broad range, with a mean value of

$$\langle T_{98}^{\text{sim}} \rangle \approx 0.132$$

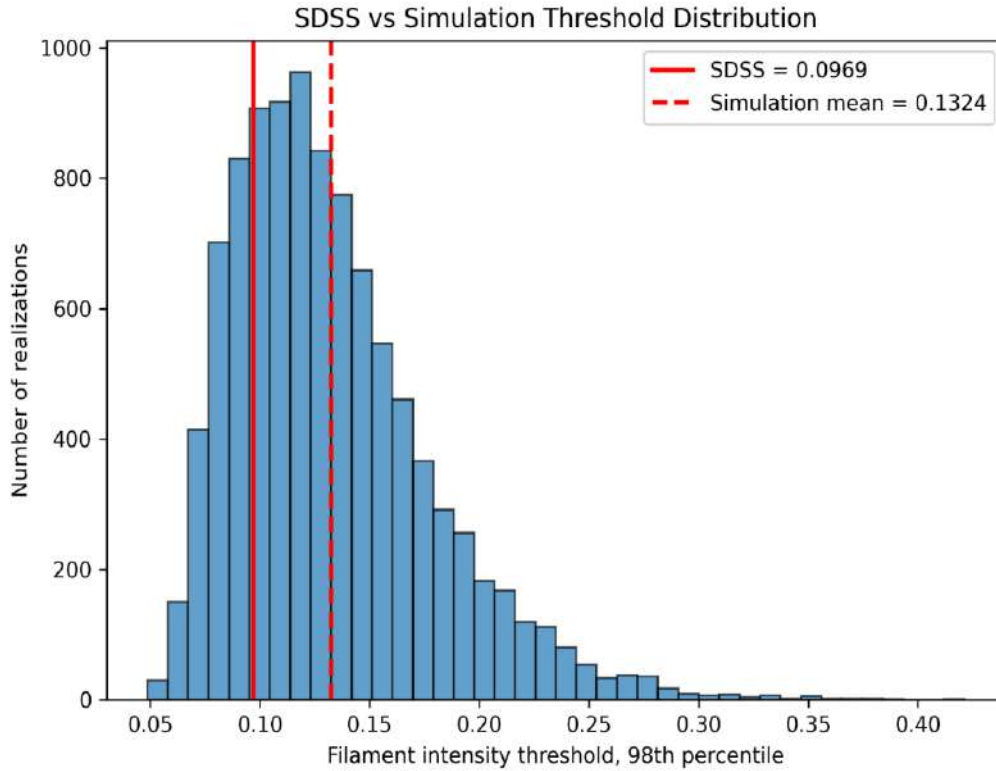
and a standard deviation of

$$\sigma_T \approx 0.045,$$

reflecting the intrinsic variability of filament strength across realizations.

Figure 8

Distribution of Simulated Filament Thresholds Histogram of filament intensity thresholds



T_{98} obtained from simulated realizations. The solid red line indicates the observed SDSS value, while the dashed red line marks the simulation mean. The spread reflects realization-to-realization variability in filament strength.

The observed SDSS value,

$$T_{98}^{\text{obs}}=0.0969,$$

is indicated as a vertical line in Figure 8; this value lies below the simulation mean and lies approximately 0.78 standard deviations below the simulation mean, remaining well within the expected statistical dispersion.

To quantify the statistical significance of this comparison, we compute the cumulative distribution function (CDF) of the simulated threshold values, shown in Figure 9. Evaluating the CDF at the observed value yields

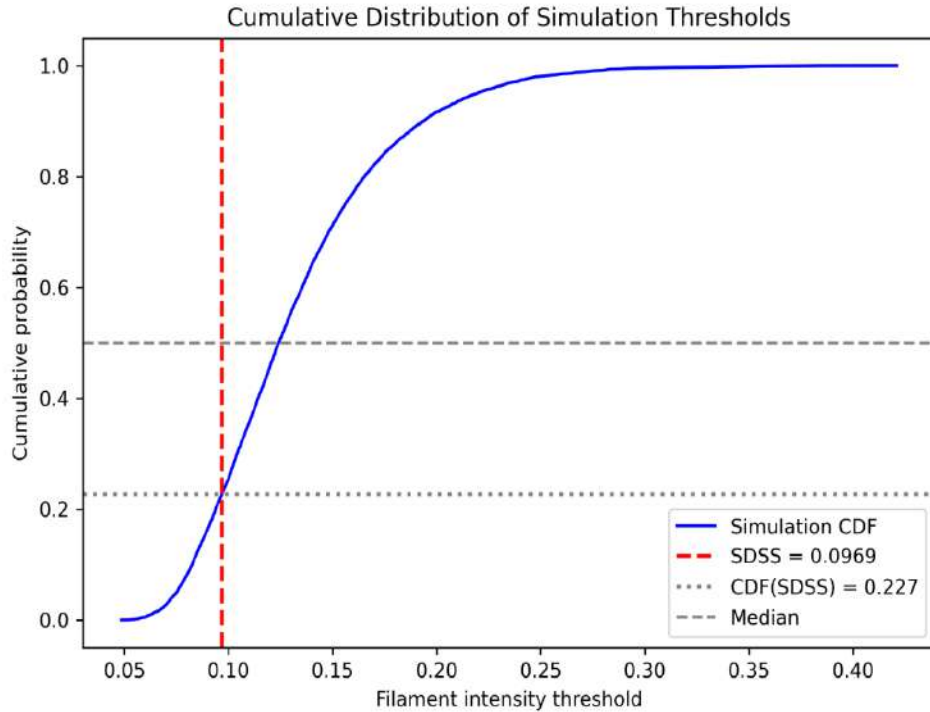
$$P(T_{98}^{\text{sim}} \leq T_{98}^{\text{obs}}) \approx 0.227$$

indicating that approximately 23% of the simulated realizations produce threshold values equal to or lower than the observed one.

Figure 9

Cumulative Distribution of Simulated Thresholds

Cumulative distribution function of simulated filament intensity thresholds. The solid red line indicates the observed SDSS value, and the corresponding cumulative probability is shown.



A quantitative summary of these results is provided in Table 1. The corresponding Z-score, $Z \approx -0.78$, and empirical p-value, $p \approx 0.42$, confirm that the observed threshold is statistically consistent with the distribution predicted by the model.

By construction, the filament fraction associated with percentile thresholding is fixed and therefore does not provide independent statistical information. The primary observable in this analysis is the threshold value T_{98} , which encodes the relative strength of filamentary structures.

Table 1

Summary of observational and simulated filament statistics.

The table compares the filament fraction and percentile-based intensity threshold measured from SDSS data with the distribution obtained from 10 000 simulated realizations. The Z-score and empirical p-value quantify the statistical consistency between observation and model.

Quantity	Observed (SDSS)	Simulations (Mean $\pm$ Std)
Number of galaxies	112 630	112 630
Redshift range	$0.06 < z < 0.09$	$0.06 < z < 0.09$
Percentile threshold	98%	98%
Filament fraction	0.020017	0.020017 ± 0.000000
Filament intensity threshold T_{98}	0.096919	0.132385 ± 0.045288
Z-score (threshold)	—	-0.7831
Empirical p-value	—	0.4157
CDF(SDSS)	—	0.2271
Number of simulations	—	10 000

By construction, the filament fraction is fixed by the percentile definition and therefore does not provide independent statistical information. The primary observable in this analysis is the threshold value T_{98} , which varies across realizations and encodes the relative strength of filamentary structures.

To complement the percentile-based analysis, we fix the filament intensity threshold to the observed SDSS value and measure the fraction of the field exceeding this threshold. In this

formulation, the observable corresponds to the spatial extent of high-intensity filamentary regions under a fixed physical criterion.

The distribution of fixed-threshold filament fractions obtained from the simulations is shown in Figure 10. Each value represents the fraction of pixels with filament intensity greater than the fixed threshold $T_{\text{obs}}=0.0969$ in an individual realization. The simulated distribution has a mean value of

$$\langle F_{\text{sim}} \rangle \approx 0.0299$$

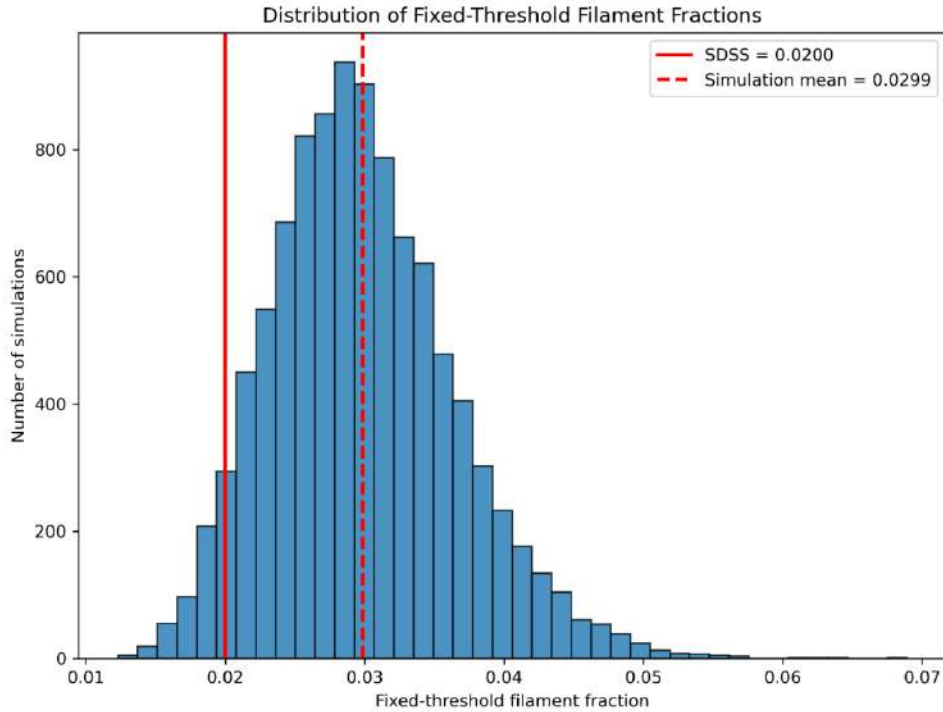
and a standard deviation of

$$\sigma_F \approx 0.0066.$$

Figure 10

Distribution of Fixed-Threshold Filament Fractions

Histogram of filament fractions obtained from simulated realizations using a fixed threshold equal to the SDSS value. The solid red line indicates the observed SDSS fraction, while the dashed red line marks the simulation mean. The displacement of the observed value toward the lower tail indicates reduced spatial coverage of high-intensity filamentary regions.



The observed SDSS value,

$$F_{\text{obs}} \approx 0.0200,$$

is indicated as a vertical line in Figure 10. This value lies below the mean of the simulated distribution and is located toward its lower tail.

To quantify this deviation, we compute the cumulative distribution function of the fixed-threshold filament fractions, shown in Figure 11.

Evaluating the CDF at the observed value yields

$$P(F_{\text{sim}} \leq F_{\text{obs}}) \approx 0.049,$$

indicating that approximately 5% of simulated realizations produce filament fractions equal to or lower than the observed value.

Interpreted as a one-sided probability, this places the observation near the lower tail of the distribution. The corresponding two-sided p-value is approximately $p \approx 0.098$, indicating that the deviation is not statistically significant at conventional confidence levels. A quantitative summary of these results is provided in Table 2.

Table 2

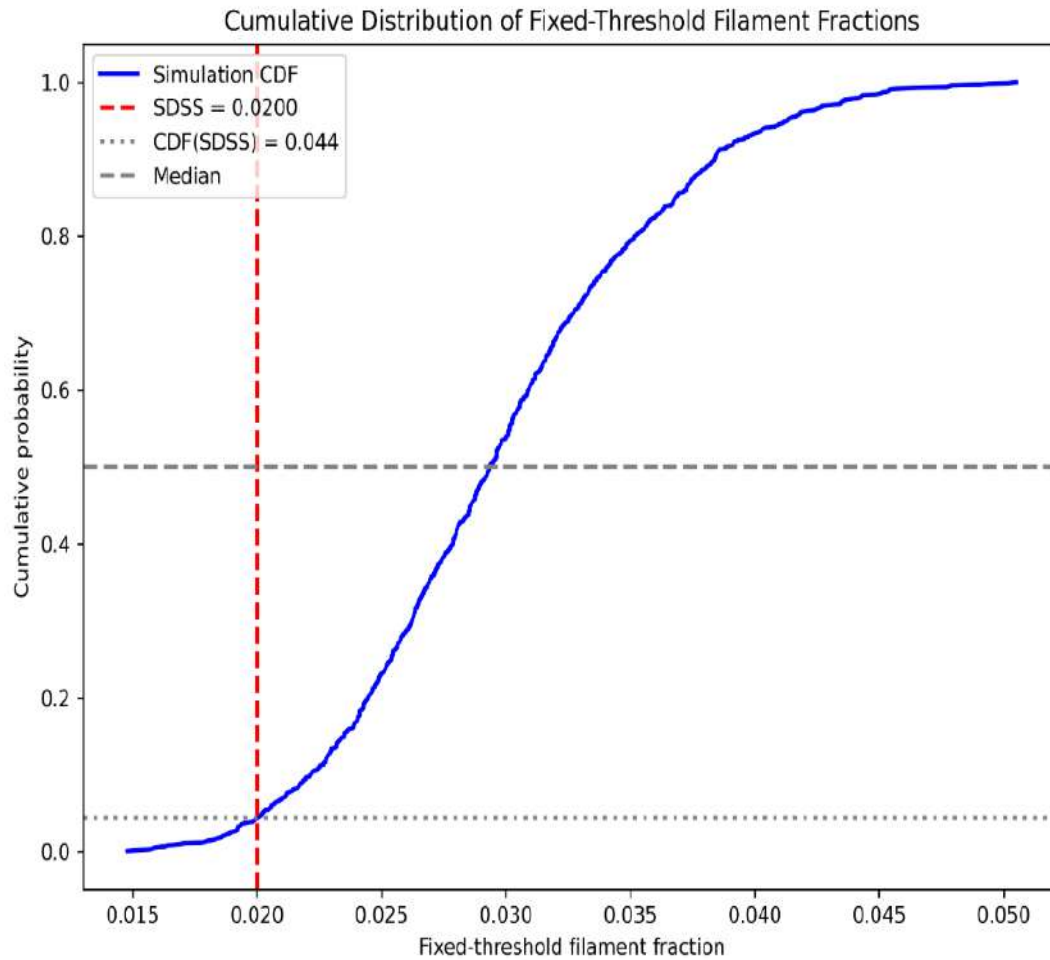
Summary of fixed-threshold filament fraction statistics

Quantity	Observed (SDSS)	Simulations (Mean $\pm$ Std)
Number of galaxies	112 630	112 630
Redshift range	$0.06 < z < 0.09$	$0.06 < z < 0.09$
Fixed threshold T_{obs}	0.096919	0.096919
Filament fraction $F(T_{\text{obs}})$	0.020017	0.029875 ± 0.006584
Z-score	—	-1.4973
Empirical p-value	—	0.0982
CDF(SDSS)	—	0.0491
Number of simulations	—	10 000

Figure 11

Cumulative Distribution of Fixed-Threshold Filament Fractions

Cumulative distribution function of simulated filament fractions under the fixed-threshold definition. The solid red line indicates the observed SDSS value, and the corresponding cumulative probability is shown.



As a final summary of the main results, a compact comparison of both observables is provided in Table 3

Table 3
Summary of filament observables.

Observable	SDSS (Observed)	Simulations (Mean $\pm$ Std)	Z-score	CDF(SDSS)	p-value
Threshold T_{98}	0.0969	0.1324 ± 0.0453	-0.78	0.227	0.416
$F(T_{\text{obs}})$	0.0200	0.0299 ± 0.0066	-1.50	0.049	0.098

DISCUSSION

The results presented in Section 5 indicate that the observed filament intensity threshold T_{98}^{obs} is statistically consistent with the distribution obtained from the ensemble of simulated realizations. The observed value lies within one standard deviation of the simulation mean and corresponds to a cumulative probability of approximately 23%, indicating that similar or lower filament strengths occur in a substantial fraction of the simulated universes.

This agreement suggests that the filamentary structure observed in the SDSS dataset is compatible with expectations from a stochastic model constructed to approximate large-scale structure within a simplified Λ CDM framework. From a physical perspective, this reflects the fact that filamentary structures arise naturally from the anisotropic gravitational collapse of initial density perturbations, forming the interconnected cosmic web of filaments and nodes (Bond, Kofman, & Pogosyan, 1996; Colberg et al., 2005)

Although the observed value lies within the expected dispersion, it is positioned in the lower half of the simulated distribution, suggesting slightly weaker filamentary structure in the SDSS sample compared to the model mean. While not statistically significant, this trend may reflect observational effects such as survey geometry, selection biases, and incomplete sampling, all of which can reduce the apparent contrast of filamentary structures in projected data.

A complementary perspective is obtained by fixing the filament intensity threshold to the observed value and measuring the fraction of the field exceeding this threshold. In this case, the observed filament fraction lies close to the lower tail of the simulated distribution, with a cumulative probability of approximately 5%, corresponding to a two-sided p-value of

approximately 0.10. This indicates that only a small fraction of simulated realizations produces filamentary regions that are as spatially limited as those observed in the SDSS data.

Although this deviation does not reach conventional levels of statistical significance, it reveals a systematic trend that is not captured by the percentile-based observable alone. While the intensity-based measure is fully consistent with the model, the extent-based observable indicates that high-intensity filamentary regions in the SDSS data are less spatially extended than in typical simulated realizations.

This asymmetry suggests that, although the amplitude of filamentary structures is well reproduced, their spatial connectivity may differ slightly between observations and the simplified model. This discrepancy likely reflects both limitations of the stochastic modeling approach, which appears to reproduce filament amplitudes more accurately than their topology, and the effects of projecting the three-dimensional galaxy distribution onto a two-dimensional field.

The contrast between these two analyses highlights the importance of observable definition in the statistical characterization of filamentary structure. The percentile-based threshold probes the intensity scale of filamentary features, while the fixed-threshold fraction probes their spatial extent. The combination of these observables provides a more complete description of the filamentary network and reveals differences that are not apparent when considering either measure alone.

It is important to recognize the limitations of the simulation framework adopted in this work. The synthetic realizations are based on simplified statistical models and do not fully capture the nonlinear dynamics of structure formation or the detailed physics of galaxy formation. In addition, the analysis is performed on a projected two-dimensional density field, which compresses three-dimensional information along the line of sight. The projection of the three-dimensional galaxy distribution onto a two-dimensional density field introduces line-of-sight mixing, whereby physically distinct structures overlap in the projected map. This effect acts as a smoothing mechanism that reduces contrast and preferentially suppresses thin, elongated filamentary features.

This projection-induced smoothing affects the two observables differently. The percentile-based threshold T_{98} , which depends on the upper tail of the intensity distribution, remains relatively robust to projection effects, as it is dominated by the highest-density regions. In contrast, the fixed-threshold filament fraction $F_{(T_{\text{obs}})}$, which measures the spatial extent of high-intensity regions, is more sensitive to this smoothing. As a result, projection effects are expected to reduce the measured filament fraction, biasing it toward lower values.

This provides a natural explanation for the tendency of the SDSS filament fraction to lie near the lower tail of the simulated distribution, without requiring a fundamental discrepancy between observations and the underlying cosmological model. The choice of the redshift interval $0.06 < z < 0.09$ partially mitigates this effect by limiting projection depth, although some loss of structural information remains unavoidable.

Finally, the dependence of the results on the smoothing scale σ was not explored and represents an additional source of systematic uncertainty. Despite these limitations, the methodology developed here provides a computationally efficient and statistically robust framework for quantifying filamentary structure in galaxy surveys, enabling direct comparison between observations and simulations in real space (Peacock, 1999).

These results therefore emphasize that simplified statistical models can capture the amplitude of filamentary structures, while more detailed simulations may be required to fully reproduce their spatial connectivity and topology.

CONCLUSIONS

This work presented a statistical analysis of filamentary structure in the large-scale distribution of galaxies using observational data from the Sloan Digital Sky Survey and a suite of synthetic cosmological simulations. By constructing a smoothed density field and applying a morphology-based filament detection method, we defined a continuous filament intensity field and introduced scalar observables to quantify filamentary structure.

Two complementary observables were considered. The first, based on percentile thresholding, measures the intensity scale required to select the most prominent filamentary regions. The second, based on a fixed threshold, measures the spatial extent of high-intensity filamentary structures. Together, these observables provide a more complete characterization of the filamentary network.

The percentile-based analysis shows that the observed threshold T_{98} lies within the expected dispersion of the simulations, with a Z-score of approximately -0.78 and an empirical p-value of ≈ 0.42 . This indicates that the overall strength of filamentary structures in the SDSS data is statistically consistent with predictions from a simplified Λ CDM-inspired model.

The fixed-threshold analysis reveals a complementary trend. When evaluated at a constant intensity threshold, the observed filament fraction lies near the lower tail of the simulated distribution, with a cumulative probability of approximately 5%. This suggests that the spatial extent of high-intensity filamentary regions in the observed data is somewhat reduced relative to the model predictions, although not at a level of strong statistical significance.

Taken together, these results support the interpretation that large-scale filamentary structure arises naturally from gravitational structure formation within the Λ CDM paradigm, while also highlighting the sensitivity of filament observables to the choice of statistical definition. The combination of intensity-based and extent-based measures provides a more nuanced view of the cosmic web than either observable alone.

The methodology developed in this work provides a computationally efficient and flexible framework for analyzing filamentary structure in galaxy surveys. While the current implementation relies on simplified simulations and two-dimensional projections, it can be naturally extended to more realistic three-dimensional analyses and higher-fidelity cosmological models. These results highlight the importance of combining multiple statistical observables when characterizing the cosmic web, as different definitions probe distinct physical aspects of large-scale structure.

Future work could explore the dependence of filament observables on redshift, smoothing scale, and survey completeness, as well as extend the analysis to larger datasets and more realistic simulations. Such developments would enable more stringent tests of structure formation and further clarify the role of filamentary morphology as a probe of cosmology.

BIBLIOGRAPHIC REFERENCES

- Aragón-Calvo, M. A., Jones, B. J. T., van de Weygaert, R., & van der Hulst, J. M. (2007). The multiscale morphology filter: Identifying and extracting spatial patterns in the galaxy distribution. *Astronomy & Astrophysics*, 474(1), 315–338. <https://doi.org/10.1051/0004-6361:20077644>
- Bond, J. R., Kofman, L., & Pogosyan, D. (1996). How filaments of galaxies are woven into the cosmic web. *Nature*, 380(6575), 603–606. <https://doi.org/10.1038/380603a0>
- Cautun, M., van de Weygaert, R., Jones, B. J. T., & Frenk, C. S. (2013). Nexus: Tracing the cosmic web connection. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 429(2), 1286–1308. <https://doi.org/10.1093/mnras/sts441>
- Colberg, J. M., Krughoff, K. S., & Connolly, A. J. (2005). Intercluster filaments in a Λ CDM universe. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 359(1), 272–282. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2005.08897.x>
- Coles, P., & Jones, B. (1991). A lognormal model for the cosmological mass distribution. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 248(1), 1–13. <https://doi.org/10.1093/mnras/248.1.1>
- Dodelson, S. (2003). *Modern cosmology*. Academic Press.

- Hamilton, A. J. S. (1998). Linear redshift distortions: A review. In D. Hamilton (Ed.), *The evolving universe* (pp. 185–275). Springer. https://doi.org/10.1007/978-94-011-4960-0_17
- Harris, C. R., Millman, K. J., van der Walt, S. J., et al. (2020). Array programming with NumPy. *Nature*, 585, 357–362. <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2649-2>
- Hogg, D. W. (1999). Distance measures in cosmology. *arXiv:astro-ph/9905116*. <https://arxiv.org/abs/astro-ph/9905116>
- Hunter, J. D. (2007). Matplotlib: A 2D graphics environment. *Computing in Science & Engineering*, 9(3), 90–95. <https://doi.org/10.1109/MCSE.2007.55>
- Martínez, V. J., & Saar, E. (2002). *Statistics of the galaxy distribution*. Chapman & Hall/CRC.
- Mukhanov, V. (2005). *Physical foundations of cosmology*. Cambridge University Press.
- Peacock, J. A. (1999). *Cosmological physics*. Cambridge University Press.
- Peebles, P. J. E. (1980). *The large-scale structure of the universe*. Princeton University Press.
- Planck Collaboration. (2018). Planck 2018 results. VI. Cosmological parameters. *Astronomy & Astrophysics*, 641, A6. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201833910>
- Python Software Foundation. (2023). Python language reference, version 3.x. <https://www.python.org>
- Sousbie, T. (2011). The persistent cosmic web and its filamentary structure: Theory and implementations. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 414(1), 350–383. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2011.18394.x>
- Sloan Digital Sky Survey Collaboration. (2023). SDSS SkyServer and CasJobs. <https://skyserver.sdss.org/CasJobs/>
- Springel, V., White, S. D. M., Jenkins, A., et al. (2005). Simulations of the formation, evolution and clustering of galaxies and quasars. *Nature*, 435(7042), 629–636. <https://doi.org/10.1038/nature03597>
- Virtanen, P., Gommers, R., Oliphant, T. E., et al. (2020). SciPy 1.0: Fundamental algorithms for scientific computing in Python. *Nature Methods*, 17, 261–272. <https://doi.org/10.1038/s41592-019-0686-2>

- Wall, J. V., & Jenkins, C. R. (2012). *Practical statistics for astronomers* (2nd ed.). Cambridge University Press.
- York, D. G., Adelman, J., Anderson, J. E., et al. (2000). The Sloan Digital Sky Survey: Technical summary. *The Astronomical Journal*, 120(3), 1579–1587.
<https://doi.org/10.1086/301513>



Comparación reproducible de modelos de lenguaje en problemas textuales de mecánica clásica mediante un benchmark automatizado

Reproducible comparison of language models in textual problems of classical mechanics using an automated benchmark

Omayra Janeth Pérez Castro

Universidad de Panamá, Facultad de Ciencias Naturales, Exactas y Tecnología, Departamento de Física, Panamá. omayra.perez@up.ac.pa <https://orcid.org/0000-0002-7080-5598>

Bernardo Fernández García

Universidad de Panamá, Facultad de Ciencias Naturales, Exactas y Tecnología, Departamento de Física, Panamá. bernardo.fernandezg@up.ac.pa <https://orcid.org/0000-0002-7947-3147>

Luis Antonio Marín Díaz

Universidad de Panamá, Facultad de Ciencias Naturales, Exactas y Tecnología, Departamento de Física, Panamá. luis.marin-d@up.ac.pa <https://orcid.org/0000-0001-8580-4128>

Juan Manuel Rodríguez Cisneros

Universidad de Panamá, Facultad de Ciencias Naturales, Exactas y Tecnología, Departamento de Física, Panamá. juan-m.rodriguez-c@up.ac.pa <https://orcid.org/0000-0002-2013-6752>

Fecha de recepción: 30 de abril de 2026

Fecha de aceptación: 11 de mayo de 2026

DOI: <https://doi.org/10.48204/j.tecno.v8n2.a10864>

RESUMEN

Este estudio presenta un benchmark textual para comparar nueve modelos comerciales de lenguaje de gran escala en la resolución de problemas de Mecánica Clásica. Se empleó un total de 42 ítems auto-contenidos y sin dependencia explícita de diagramas, extraídos de materiales abiertos de MIT OpenCourseWare correspondientes a 2005 y 2016. Los modelos evaluados pertenecieron a tres proveedores: OpenAI, Anthropic y Google Gemini. Cada problema se presentó mediante un mismo prompt estructurado con respuesta final, resumen breve del razonamiento, ecuaciones, unidades, nivel de confianza. La corrida completa produjo 378 respuestas utilizables. La referencia de corrección se construyó en dos etapas: consenso numérico para 22 ítems y curación manual para 19 casos sin consenso; un ítem permaneció ambiguo por dependencia residual de figuras ausentes. El pipeline alcanzó 100% de éxito final, aunque 29 salidas truncadas requirieron



recuperación a nivel de parser. En acuerdo heurístico con la referencia curada, Gemini obtuvo el mejor rendimiento agregado por proveedor (43.7%; 55/126), mientras que gemini-3.1-pro-preview alcanzó el mejor resultado a nivel de modelo (61.9%; 26/42). Anthropic produjo las respuestas más extensas y lentas, y gemini-3-flash-preview fue el modelo más veloz. Los hallazgos muestran que los LLMs ya apoyan evaluaciones reproducibles en física sin reemplazar expertos.

PALABRAS CLAVE

Modelos de lenguaje, enseñanza de la física, mecánica clásica, benchmark, evaluación comparativa

ABSTRACT

This study presents a textual benchmark to compare nine large-scale commercial language models for solving Classical Mechanics problems. A total of 42 self-contained items, without explicit dependence on diagrams, were extracted from MIT OpenCourseWare open-source materials from 2005 and 2016. The evaluated models came from three vendors: OpenAI, Anthropic, and Google Gemini. Each problem was presented using the same structured prompt, including a final answer, a summary of the reasoning, equations, units, and confidence level. The complete run yielded 378 usable responses. The correction reference was built in two stages: numerical consensus for 22 items and manual curation for 19 cases lacking consensus; one item remained ambiguous due to residual dependence on missing figures. The pipeline achieved 100% final success, although 29 truncated outputs required parser-level recovery. In heuristic agreement with the curated reference, Gemini achieved the best aggregate performance by vendor (43.7%; 55/126), while gemini-3.1-pro-preview achieved the best result at the model level (61.9%; 26/42). Anthropic produced the longest and slowest responses, and gemini-3-flash-preview was the fastest model. The findings show that LLMs already support reproducible assessments in physics without replacing experts.

KEYWORDS

Large language models, physics education, classical mechanics, benchmark, comparative evaluation

INTRODUCCIÓN

En los últimos años, los grandes modelos de lenguaje (LLMs, por sus siglas en inglés) han pasado de ser herramientas de generación textual a convertirse en sistemas capaces de intervenir en tareas de explicación, tutoría y resolución de problemas. Ese desplazamiento ha reactivado la discusión sobre su valor en la educación en ciencias y sobre el alcance real de sus competencias lingüísticas y metalingüísticas (Beguš et al., 2025; Rodríguez Fernández et al., 2024).

En Física, el interés por estos sistemas no se limita a su fluidez verbal. Un modelo útil en este dominio debe interpretar enunciados, seleccionar principios relevantes, traducir relaciones físicas a expresiones matemáticas y sostener una explicación compatible con las leyes de la mecánica. Esa combinación exige algo más que solo usar lenguaje: requiere razonamiento



cuantitativo, control conceptual y vigilancia sobre unidades, condiciones iniciales y supuestos del problema (Ding et al., 2023; Zhao et al., 2024).

La resolución de problemas de Mecánica Clásica constituye un terreno especialmente exigente para evaluar estas capacidades. La literatura sobre didáctica de la Física ha mostrado que resolver problemas no equivale a aplicar fórmulas de forma automática: los problemas más ricos demandan análisis cualitativo, construcción de representaciones, selección de principios físicos y evaluación crítica de los resultados obtenidos (Gil Pérez & Valdés Castro, 1994; Navarro Altamar, 2006; Perales Palacios, 1993; Guisasola et al., 2015). Esa diferencia entre razonamiento novato y razonamiento experto resulta clave al analizar respuestas de LLMs, pues muchos de sus errores no son meramente aritméticos, sino estructurales o conceptuales.

Las evaluaciones disponibles sugieren que los LLMs pueden aproximarse al desempeño humano en ciertos ejercicios introductorios de Física, pero su rendimiento cae cuando los problemas exigen composición matemática, consistencia entre múltiples pasos o interpretación de condiciones implícitas (Kortemeyer, 2023; Dao et al., 2023; Sato, 2024). Más recientemente, han surgido benchmarks de mayor cobertura, como UGPhysics y PhysReason, que documentan avances relevantes pero también limitaciones persistentes en razonamiento físico multi-paso (Xu et al., 2025; Zhang et al., 2025).

Sin embargo, todavía hacen falta evaluaciones comparativas acotadas, reproducibles y metodológicamente homogéneas que controlen de manera estricta el prompt, la estructura de salida, el postprocesamiento y el criterio de puntuación, particularmente cuando se comparan proveedores comerciales bajo un mismo corpus disciplinar. Mientras UGPhysics y PhysReason privilegian la amplitud temática, el presente trabajo se concentra en un banco pequeño, homogéneo y exclusivamente textual de Mecánica Clásica, con énfasis en la trazabilidad del pipeline y en la comparabilidad directa entre respuestas.

El objetivo de este artículo es triple. Primero, documentar un pipeline reproducible para correr, parsear, puntuar y visualizar respuestas de múltiples LLMs en Mecánica Clásica. Segundo, comparar el desempeño de los modelos mediante una referencia curada explícita. Tercero, identificar en qué dimensiones del proceso experimental se ubican las principales fuentes de variación: formato de salida, estabilidad operativa, latencia, longitud de respuesta y acuerdo con la solución de referencia.



MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se articuló en torno a tres preguntas clave. La primera fue operacional: ¿pueden distintos LLMs comerciales completar un benchmark de Mecánica Clásica con un formato

estructurado y sin fallos duros de parseo? La segunda fue comparativa: ¿qué modelos muestran mayor acuerdo con una referencia de corrección curada bajo un mismo protocolo de inferencia? La tercera fue analítica: ¿cómo cambian esos resultados según proveedor, familia de modelo, latencia, extensión de la respuesta y área temática del problema?

Se realizó un estudio comparativo, descriptivo y reproducible con enfoque mixto. La unidad básica de análisis fue la respuesta generada por un modelo ante un problema de Mecánica Clásica. El diseño combinó métricas operativas de ejecución y parseo con una comparación heurística frente a una referencia de corrección curada. Esta estrategia permitió evaluar simultáneamente la robustez de la infraestructura y la calidad aparente de las respuestas. El trabajo corresponde a un benchmark de laboratorio computacional, no a una intervención educativa con estudiantes.

El corpus estuvo compuesto por 42 ítems provenientes de dos colecciones abiertas de MIT OpenCourseWare: Physics I: Classical Mechanics (Massachusetts Institute of Technology [MIT], 2005) y Classical Mechanics (MIT, 2016). Todos los problemas incluidos pertenecieron a una versión local text-only del benchmark y cumplieron tres criterios operativos: ser auto-contenidos, no requerir diagramas para su interpretación inmediata y estar listos para evaluación exclusivamente textual.

El pipeline partió de un archivo maestro con metadatos por ítem. La selección final retuvo únicamente problemas etiquetados como utilizables para LLM, auto-contenidos y preparados para modalidad textual. En esta etapa se excluyeron ejercicios con dependencia visual indispensable, formatos no textuales o enunciados excesivamente fragmentarios. El corpus no corresponde a un instrumento psicométricamente validado: todos los registros del archivo maestro estaban clasificados como open_oer_non_psychometric. Por ello, los resultados deben interpretarse como evidencia comparativa de desempeño en un banco de problemas abiertos de Mecánica Clásica, y no como una medición estandarizada del aprendizaje conceptual en el sentido de instrumentos como el Force Concept Inventory (Hestenes et al., 1992).

Predominaron los problemas numérico-simbólicos (40 de 42 ítems), mientras que solo dos combinaron explicación cualitativa con respuesta numérica. El área temática más representada fue cinemática (10 ítems), seguida por movimiento circular (5) y movimiento rotacional (4).



Tabla 1*Composición temática del corpus de evaluación*

Área temática	n
Cinemática	10
Movimiento circular	5
Movimiento rotacional	4
Cantidad de movimiento e impulso	4
Restricciones y fuerzas resistivas	3
Transferencia de masa y velocidad relativa	3
Energía potencial	3
Choques	3
Rodadura	2
Trabajo y energía cinética	2
Energía	1
Momento angular	1
Leyes de Newton	1
Total	42

Nota. El corpus final estuvo compuesto por problemas abiertos de MIT OpenCourseWare adaptados a evaluación textual.

Se evaluaron nueve modelos comerciales, tres por proveedor: OpenAI (gpt-5.4, gpt-5.4-mini y gpt-5.4-nano), Anthropic (claude-opus-4-6, claude-sonnet-4-6 y claude-haiku-4-5) y Google Gemini (gemini-3.1-pro-preview, gemini-3-flash-preview y gemini-3.1-flash-lite-preview). Se muestran los identificadores exactamente como aparecieron, para que el experimento pueda rastrearse y verificarse. Esos identificadores reflejan lo que estaba disponible localmente en marzo de 2026.

Cada par modelo-ítem se evaluó una sola vez bajo configuración de producción fija, sin muestreo repetido ni búsqueda de la mejor respuesta entre múltiples corridas. El límite de salida fue de 1400 tokens por solicitud. OpenAI se consultó mediante Responses API con salida estructurada; Anthropic mediante Messages API con restricciones de salida JSON y parser tolerante a truncamientos; y Gemini mediante generateContent con application/json, candidateCount = 1 y temperatura cero. En Gemini 3.1 Pro se habilitó un presupuesto moderado de pensamiento, mientras que en los modelos Flash y Flash Lite se desactivó. Dado que los catálogos de modelos cambian con rapidez, la comparación debe leerse como una fotografía experimental fechada.



La latencia reportada en este artículo debe interpretarse como una métrica descriptiva del entorno local de ejecución y de las condiciones de red observadas el día del experimento. No se trata, por tanto, de una medición absoluta de rendimiento de infraestructura entre proveedores.

Tabla 2
Configuración experimental por proveedor

Proveedor	Modelos	Estrategia de salida estructurada
OpenAI	gpt-5.4; gpt-5.4-mini; gpt-5.4-nano	Responses API con salida estructurada y un solo intento por ítem
Anthropic	claude-opus-4-6; claude-sonnet-4-6; claude-haiku-4-5	Messages API con restricciones de salida JSON y parser tolerante a truncamientos
Gemini	gemini-3.1-pro-preview; gemini-3-flash-preview; gemini-3.1-flash-lite-preview	generateContent con application/json, temperature = 0 y candidateCount = 1

Nota. Todas las corridas se ejecutaron en marzo de 2026 con el prompt versionado physics-benchmark-json-v1 y un límite de 1400 tokens de salida.

Todos los modelos recibieron el mismo prompt base. Dicho prompt solicitó una única salida JSON con siete campos obligatorios: `final_answer`, `reasoning_summary`, `equations_used`, `units`, `confidence`, `needs_human_review` y `review_note`. La intención de este diseño fue evitar formatos libres difíciles de comparar y, al mismo tiempo, preservar suficiente información para revisar la estructura del razonamiento.

El prompt incluyó metadatos del ítem—identificador, título, `broad_topic`, `subtopic` y `answer_format_guess`— y una instrucción explícita para marcar `needs_human_review` cuando el problema fuese ambiguo, incompleto o dependiera de una figura ausente. Todas las ejecuciones quedaron registradas en archivos JSONL y CSV con metadatos de proveedor, modelo, tokens, latencia, motivo de finalización y texto crudo de respuesta.

El barrido produjo 378 respuestas para 9 modelos sobre 42 problemas. Aunque el parseo final alcanzó 100%, se registraron 29 respuestas truncadas que debieron recuperarse a nivel de parser. Estas recuperaciones se concentraron en claude-opus-4-6 (16), claude-sonnet-4-6 (9) y gemini-3.1-pro-preview (4).

La corrida se ejecutó en modo single-pass: no se realizaron reruns para mejorar respuestas individuales ni se permitió que un modelo viera respuestas de otro. El objetivo fue simular



una evaluación ciega, homogénea y trazable, más cercana a un benchmark comparativo que a un proceso iterativo de tutoría.

La referencia utilizada para puntuar las respuestas no se tomó de un solucionario oficial único. En su lugar, se construyó una clave de referencia curada en dos etapas. Primero, se identificaron agrupamientos de consenso exacto o numérico entre múltiples modelos. Cuando al menos tres respuestas coincidían tras normalización o dentro de una tolerancia relativa de 2%, esa solución se tomó como referencia provisional.

Segundo, los ítems sin consenso robusto se revisaron manualmente mediante derivación física razonada. Como resultado, 22 ítems quedaron clasificados como `draft_numeric_consensus`, 19 como `curated_manual_reasoning` y 1 como `text_unanswerable_or_ambiguous`. Ese último caso correspondió al ítem MIT05_PS02_Q02 “Geometry and Angles” (Physics I: Classical Mechanics, MIT OCW 2005, Problem Set 2, problema 2), un ejercicio cuyo enunciado, aun habiendo sido marcado como auto-contenido y `text_only_ready` en el archivo maestro, conservó una dependencia residual de información geométrica originalmente codificada en tres figuras del material fuente con ángulos numerados y marcas de ángulo recto.

El enunciado textual aislado no permitía reconstruir unívocamente esa configuración: en el archivo de respuestas, los nueve modelos coincidieron en marcar `parsed_needs_human_review=True` para este único ítem (el único caso de unanimidad en autoseñalización del estudio), y siete de ellos lo declararon explícitamente en `parsed_review_note` como “missing figures”, “diagrams not provided” o equivalentes.

El caso ilustra un límite importante del razonamiento puramente textual: cuando un problema de mecánica codifica supuestos críticos en un diagrama (direcciones, signos, geometría de vínculos o convenciones de ejes), ningún LLM sin entrada visual puede recuperar esa información por inferencia lingüística, y la ambigüedad se traslada en bloque a la respuesta final.

Conviene aclarar, además, que la dependencia residual de figuras no se limitó a este único ejercicio: el conteo de menciones en `parsed_review_note` muestra que 19 ítems distintos recibieron al menos una queja explícita por figura ausente o geometría no especificada, aunque solo MIT05_PS02_Q02 resultó lo bastante ambiguo como para impedir la fijación de una respuesta de referencia. Por ello, este ítem se reportó como ambiguo y se excluyó del cómputo del acuerdo, pero se preservó en el corpus por su valor diagnóstico sobre las fronteras de la modalidad text-only.



Este procedimiento produjo una referencia operativa útil para la comparación entre modelos, pero no reemplaza una rúbrica independiente validada por un panel externo de expertos. En consecuencia, los resultados se interpretan aquí como acuerdo con una referencia curada, y no como exactitud absoluta.

Se calcularon tasas de éxito de API, parseo correcto, disponibilidad de respuesta final, autoseñalización de revisión humana, latencia media, tokens medios y acuerdo heurístico con la referencia curada. Este último indicador se definió como coincidencia exacta de texto, inclusión sustantiva de la respuesta canónica o coincidencia numérica dentro de tolerancia. Dado que no se utilizó un juez semántico externo en esta versión del análisis, el acuerdo heurístico debe leerse como una aproximación conservadora y trazable al desempeño comparado.

La tolerancia numérica empleada fue de 2% en términos relativos y $1e-6$ en valor absoluto. Cuando la respuesta contenía varias magnitudes numéricas, el scorer exigió coincidencia posicional completa entre listas de valores. No se aplicaron pruebas inferenciales ni contrastes de hipótesis entre modelos, porque el propósito de esta versión del manuscrito es descriptivo-comparativo y el corpus no fue diseñado como muestra probabilística. En cambio, se privilegiaron tablas resumidas, tasas agregadas por proveedor y modelo y análisis por áreas temáticas, complementados con conteos absolutos cuando estos mejoraban la transparencia interpretativa.

RESULTADOS

En términos operativos, el pipeline mostró un comportamiento notablemente estable. Las 378 solicitudes completaron la llamada de API y terminaron integradas al CSV final, lo que implica 100% de éxito de ejecución y 100% de parseo utilizable. Este resultado es importante porque uno de los principales obstáculos para evaluar LLMs en dominios técnicos no es solo la calidad de la respuesta, sino la consistencia del formato de salida.

Sin embargo, la robustez final no debe confundirse con ausencia de incidentes intermedios. El sistema tuvo que recuperar 29 respuestas truncadas: 16 de claude-opus-4-6, 9 de claude-sonnet-4-6 y 4 de gemini-3.1-pro-preview. En otras palabras, el uso de salidas estructuradas redujo la fragilidad del pipeline, pero no eliminó del todo los problemas de serialización cuando algunos modelos produjeron respuestas extensas o alcanzaron el límite de tokens.

A nivel agregado por proveedor, Gemini mostró el mayor acuerdo heurístico con la referencia curada (43.7%; 55/126), seguido por Anthropic (34.1%; 43/126) y OpenAI (12.7%; 16/126). Anthropic produjo las respuestas más largas (837.7 tokens de salida, en promedio) y también



la mayor latencia media (12.18 s). OpenAI fue el proveedor más rápido en promedio (4.48 s), pero también el que mostró menor acuerdo con la referencia.

Además, fue el proveedor que con mayor frecuencia marcó sus respuestas para revisión humana (31.0%), lo que sugiere una actitud más conservadora, aunque no necesariamente más acertada.

Tabla 3

Desempeño descriptivo por proveedor

Proveedor	Éxito API	Parseo correcto	Acuerdo heurístico	Coincidencia numérica	Latencia media (s)	Tokens salida	Auto-revisión
gemini	100.0%	100.0%	43.7%	42.9%	5.62	304.3	8.7%
anthropic	100.0%	100.0%	34.1%	34.1%	12.18	837.7	20.6%
openai	100.0%	100.0%	12.7%	11.1%	4.48	325.1	31.0%

Nota. El acuerdo heurístico corresponde a coincidencia exacta, coincidencia por inclusión o coincidencia numérica dentro de una tolerancia relativa del 2%.

A nivel de modelo individual, el mejor rendimiento correspondió a gemini-3.1-pro-preview (61.9%; 26/42), seguido por claude-opus-4-6 (50.0%; 21/42). El modelo más veloz fue gemini-3-flash-preview con 2.61 s por respuesta, mientras que el más lento fue claude-opus-4-6 con 15.91 s. En la familia Anthropic se observó un patrón claro: mayor acuerdo heurístico se asoció con respuestas más extensas y mayor costo temporal. En OpenAI, la disminución de tamaño de modelo no se tradujo en mejor eficiencia epistémica; por el contrario, gpt-5.4-nano presentó el menor acuerdo y la mayor tasa de autoseñalización de revisión (61.9%).

Tabla 4

Desempeño descriptivo por modelo

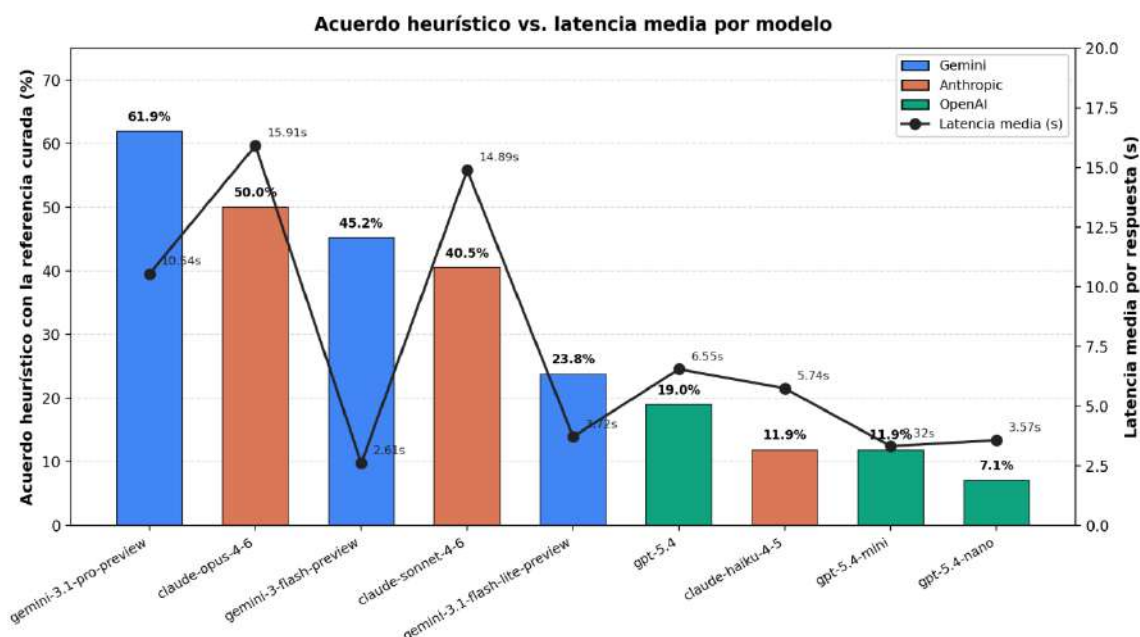
Modelo	Proveedor	Acuerdo heurístico	Coincidencia numérica	Latencia media (s)	Tokens salida	Auto-revisión
gemini-3.1-pro-preview	gemini	61.9%	61.9%	10.54	268.5	9.5%
claude-opus-4-6	anthropic	50.0%	50.0%	15.91	938.1	19.0%
gemini-3-flash-preview	gemini	45.2%	42.9%	2.61	304.4	7.1%
claude-sonnet-4-6	anthropic	40.5%	40.5%	14.89	958.4	4.8%
gemini-3.1-flash-lite-preview	gemini	23.8%	23.8%	3.72	340.1	9.5%
gpt-5.4	openai	19.0%	16.7%	6.55	323.4	14.3%
claude-haiku-4-5	anthropic	11.9%	11.9%	5.74	616.6	38.1%
gpt-5.4-mini	openai	11.9%	9.5%	3.32	314.5	16.7%
gpt-5.4-nano	openai	7.1%	7.1%	3.57	337.3	61.9%

Nota. Los resultados corresponden a 42 ítems por modelo y se basan en agreement scoring heurístico contra una referencia curada.



Figura 1

Acuerdo heurístico vs. latencia media por modelo



Nota. Las barras representan el acuerdo heurístico con la referencia curada (eje izquierdo) y la línea negra la latencia media por respuesta en segundos (eje derecho). El color de cada barra indica el proveedor. Los modelos están ordenados de mayor a menor acuerdo. Elaboración propia a partir de los datos de la Tabla 4.

La Figura 1 sintetiza visualmente los hallazgos de la Tabla 4 y permite leer simultáneamente las dos dimensiones críticas del benchmark. En primer lugar, evidencia que el liderazgo de Gemini no es uniforme dentro del proveedor: gemini-3.1-pro-preview encabeza el ranking de acuerdo, pero gemini-3.1-flash-lite-preview cae al quinto lugar, lo que sugiere que la diferencia interna por familia es comparable a la diferencia entre proveedores.

La superposición de la línea de latencia muestra que el acuerdo no es una función monótona del tiempo de respuesta: gemini-3-flash-preview alcanza el tercer mejor acuerdo (45.2%) con la menor latencia del estudio (2.61 s), mientras que los modelos Anthropic obtienen acuerdos intermedios al costo de las latencias más altas (entre 14.89 s y 15.91 s). Finalmente, el bloque OpenAI se concentra en la zona de bajo acuerdo con latencias moderadas, lo que confirma que en este corpus la velocidad por sí sola no compensa el déficit de coincidencia con la referencia curada.

El análisis temático mostró diferencias relevantes entre proveedores. Gemini dominó varias áreas de cálculo y conservación, con sus mejores resultados en trabajo y energía cinética



(83.3%), choques (77.8%) y cantidad de movimiento e impulso. Anthropic se comportó relativamente mejor en problemas de energía potencial y en algunos ítems de movimiento rotacional, donde alcanzó 50.0% de acuerdo heurístico promedio.

Por contraste, OpenAI mantuvo un desempeño bajo en la mayoría de los ejes temáticos y solo se acercó a sus competidores en un subconjunto pequeño de trabajo y energía. También es relevante que el único ítem clasificado bajo la categoría `broad_topic = energy` produjo 0% de acuerdo heurístico en los tres proveedores. Este hallazgo puede interpretarse de dos maneras no excluyentes: el ítem introducía una formulación especialmente exigente para los modelos o el esquema de comparación heurística resultó demasiado estricto para una respuesta conceptualmente válida expresada con otra redacción.

DISCUSIÓN

Los resultados permiten sostener que la principal madurez observada en los LLMs evaluados no reside todavía en su precisión física global, sino en su capacidad para incorporarse a flujos de evaluación reproducibles. Con un prompt estructurado, control del formato de salida y un parser tolerante a truncamientos, fue posible ejecutar y consolidar 378 respuestas comparables sin fallos duros de parseo. Desde una perspectiva metodológica, este es un avance relevante para investigaciones futuras en evaluación automática de razonamiento científico.

No obstante, el rendimiento disciplinar siguió siendo heterogéneo. El mejor modelo del estudio no superó 61.9% de acuerdo con la referencia, y el mejor proveedor se situó en 43.7%. Estos valores distan de un nivel que permitiría tratar a los modelos como sustitutos confiables de una resolución experta en Mecánica Clásica. La diferencia entre modelos también sugiere que la escala o la verbosidad por sí solas no garantizan mejor desempeño: algunos sistemas fueron más rápidos y compactos, pero no necesariamente más correctos, y otros produjeron explicaciones largas sin mejorar de forma proporcional la calidad final.

Este patrón es coherente con evaluaciones previas y con benchmarks recientes de física, que muestran avances importantes en tareas introductorias, pero degradación cuando los problemas requieren razonamiento multi-paso, integración simbólico-numérica y control fino de condiciones implícitas (Kortemeyer, 2023; Xu et al., 2025; Zhang et al., 2025). Desde el punto de vista didáctico, el desempeño más prometedor aparece en problemas cuya solución puede representarse de manera algebraica o numérica con alta restricción formal. En cambio, los ítems con mayor carga interpretativa o formulaciones más abiertas siguen generando respuestas variables.

Una mirada cualitativa al subconjunto de respuestas no concordantes, apoyada en el conteo de menciones registradas en el campo `parsed_review_note` del archivo de resultados, permite



distinguir tipos de errores recurrentes. De las 378 respuestas, 80 incluyeron una nota de revisión no vacía; sobre ese subconjunto, las categorías siguientes no son excluyentes entre sí. El grupo más frecuente corresponde a quejas por dependencia residual de figuras o geometría no especificada (45 menciones, distribuidas en 19 ítems distintos): el modelo identifica el dominio pero declara explícitamente que el enunciado textual no fija ángulos, configuración de vínculos o relaciones espaciales necesarias. Un segundo grupo, casi de la misma magnitud (33 menciones), corresponde a errores de supuesto, en los que el modelo completa la información faltante con una asunción razonable pero no necesariamente coincidente con la convención de la fuente (por ejemplo, asumir un ángulo de 90° en una ranura en V cuyo ángulo no se especifica). Un tercer grupo (31 menciones) recoge errores asociados a ambigüedad o redacción corrupta del enunciado, que en algunos casos llevaron al modelo a proponer interpretaciones alternativas en la propia respuesta. Un cuarto grupo, más sutil (18 menciones), son errores de signo, dirección o convención de ejes (típicamente sentidos de fuerza, orientación del eje o sentido de giro que el enunciado no fija explícitamente).

Junto a estos, aparecen errores de planteamiento físico (selección de un principio inadecuado, como aplicar conservación de energía mecánica en presencia de fricción) y errores de ejecución algebraica o numérica sobre un planteamiento correcto, los cuales en su mayoría no quedaron registrados en `parsed_review_note` porque los modelos no los reconocieron como tales y por lo tanto deben inferirse por inspección de las respuestas. Errores explícitos de unidades fueron, en cambio, muy poco frecuentes (apenas 2 menciones), lo que sugiere que el ranking de modelos no estaría sesgado por la sensibilidad del scorer heurístico a las unidades. Mencion aparte merecen los errores de cierre por truncamiento: 29 respuestas alcanzaron el límite de tokens y debieron recuperarse a nivel de parser, concentradas en `claude-opus-4-6`, `claude-sonnet-4-6` y `gemin-3.1-pro-preview`; críticamente, ninguna de las respuestas truncadas fue autoseñalizada por el modelo como necesidad de revisión, lo que indica que el truncamiento es un punto ciego de las propias respuestas y refuerza la utilidad de monitorear `finish_reason` además de `parsed_needs_human_review`.

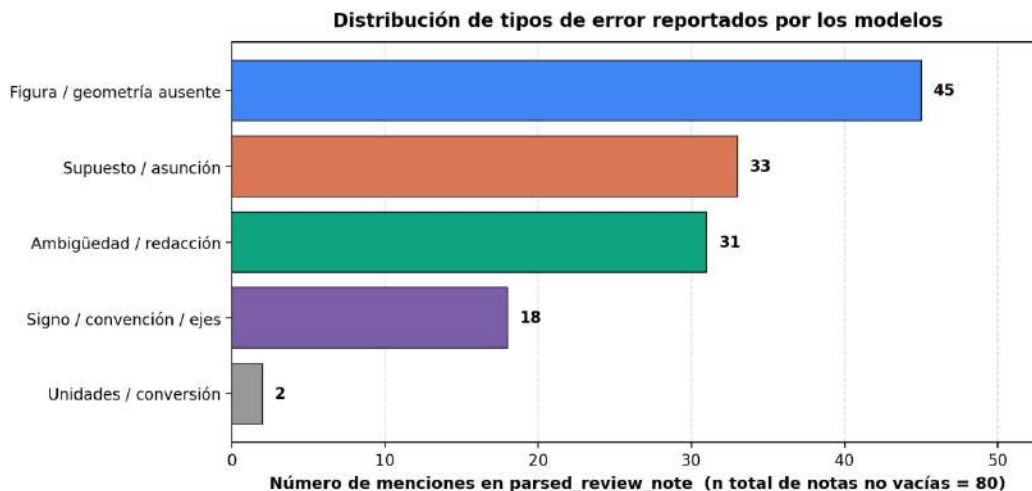
En conjunto, esta distribución sugiere que el déficit dominante en el corpus no es aritmético sino representacional (reconstrucción geométrica y elección de convenciones), y que un juez semántico podría reclasificar parte de los casos de supuesto y convención sin alterar el orden general entre proveedores.

Figura 2

Distribución de tipos de error reportados por los modelos en `parsed_review_note`

168





Nota. Conteo de menciones por categoría sobre el subconjunto de 80 respuestas con parsed_review_note no vacía (de un total de 378). Las categorías no son mutuamente excluyentes: una misma nota puede mencionar varios tipos de error. Las menciones se identificaron mediante palabras clave en el texto crudo (figure/diagram/missing/geometry,assume,ambiguous/unclear/interpret/garbled,sign/direction/orient/axis/convention, unit/convert).

Tabla 5

Ítems con consenso de revisión (≥ 5 de 9 modelos marcaron needs_human_review)

benchmark_id	Título	broad_topic	Modelos que pidieron revisión	Fuente
MIT05_PS02_Q02	Geometry and Angles	kinematics	9 / 9	MIT 2005, PS2 Q2
MIT16_PS10_Q05	A Cylinder Rolling in a V-Groove	rotational_motion	7 / 9	MIT 2016, PS10 Q5
MIT16_PS02_Q04	Dragging two blocks	newtons_laws	5 / 9	MIT 2016, PS2 Q4
MIT16_PS08_Q03	Objects on a Ring	potential_energy	5 / 9	MIT 2016, PS8 Q3

Nota. Lista de los ítems donde al menos 5 de los 9 modelos marcaron parsed_needs_human_review = True. Solo MIT05_PS02_Q02 alcanzó unanimidad de 9/9 y fue el único clasificado como text_unanswerable_or_ambiguous en la curación manual.

La Figura 2 y la Tabla 5 hacen visible un patrón que el texto solo dejaba implicado: la concentración de las observaciones autocríticas de los modelos en problemas con



dependencia geométrica residual. De los cuatro ítems con consenso de revisión ($\geq 5/9$), tres

pertenecen a problemas de mecánica avanzada con configuraciones espaciales no triviales — ranura en V, bloques arrastrados, objetos sobre un anillo— donde, sin la figura original, queda ambigua alguna pieza geométrica esencial (ángulo de la ranura, configuración de la polea, posición del punto de anclaje). Este consenso entre modelos heterogéneos en proveedor, escala y familia funciona como un indicador externo útil: cuando varios LLMs coinciden en pedir revisión humana sobre un mismo ítem, es un buen criterio operativo para auditar el enunciado en la siguiente iteración del corpus.

CONCLUSIONES

La comparación realizada muestra que los LLMs pueden integrarse de forma operativamente robusta en benchmarks reproducibles de Mecánica Clásica, siempre que se impongan salidas estructuradas y se controle cuidadosamente el postprocesamiento. En este plano, el pipeline desarrollado constituye un aporte metodológico útil para futuras investigaciones en evaluación automática de razonamiento físico y, de manera indirecta, para la educación científica asistida por inteligencia artificial.

En el plano disciplinar, sin embargo, los resultados son más sobrios. Gemini alcanzó el mejor rendimiento agregado y gemini-3.1-pro-preview lideró a nivel de modelo, pero incluso los mejores sistemas se mantuvieron en un rango de acuerdo moderado con la referencia curada. Por ello, la evidencia disponible apoya el uso de LLMs como herramientas auxiliares para exploración, apoyo tutorial o generación de borradores de solución, pero no como reemplazo del juicio experto ni de la validación docente en Física.

Como siguiente etapa, el estudio debería ampliarse con una clave de corrección validada por un panel de especialistas, un componente de judge-based scoring y una muestra que incorpore más ítems conceptuales y multimodales. Esa ampliación permitiría transformar el presente manuscrito desde un benchmark operativo sólido hacia una evaluación más robusta del razonamiento físico de los modelos.



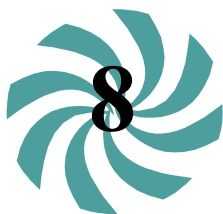
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Beguš, G., Dąbkowski, M., & Rhodes, R. (2025). Large linguistic models: Investigating LLMs' metalinguistic abilities. *IEEE Transactions on Artificial Intelligence*, 6(12), 3453–3467. <https://doi.org/10.1109/TAI.2025.3575745>
- Dao, X.-Q., Le, N.-B., Phan, X.-D., Ngo, B.-B., & Vo, T.-D. (2023). Evaluation of ChatGPT and Microsoft Bing AI chat performances on physics exams of Vietnamese National High School Graduation Examination. *arXiv*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2306.04538>
- Ding, J., Cen, Y., & Wei, X. (2023). Using large language model to solve and explain physics word problems approaching human level. *arXiv*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2309.08182>
- Gil Pérez, D., & Valdés Castro, P. (1994). La resolución de problemas de física: De los ejercicios de aplicación al tratamiento de situaciones problemáticas. *Revista Española de Física*, 8(3), 21–26.
- Guisasola, J., Zuza, K., Garmendia, M., & Barragués, J. I. (2015). Resolver ejercicios no es fácil: El papel de la metodología científica en la resolución de problemas de física. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, 37(3), 3508. <https://doi.org/10.1590/S1806-1173731969>
- Hestenes, D., Wells, M., & Swackhamer, G. (1992). Force Concept Inventory. *The Physics Teacher*, 30(3), 141–158. <https://doi.org/10.1119/1.2343497>
- Kortemeyer, G. (2023). Could an artificial-intelligence agent pass an introductory physics course? *Physical Review Physics Education Research*, 19(1), 010132. <https://doi.org/10.1103/PhysRevPhysEducRes.19.010132>
- Massachusetts Institute of Technology. (2005). *Physics I: Classical Mechanics*. MIT OpenCourseWare. <https://ocw.mit.edu/courses/8-01-physics-i-classical-mechanics-fall-2005/>
- Massachusetts Institute of Technology. (2016). *Classical Mechanics*. MIT OpenCourseWare. <https://ocw.mit.edu/courses/8-01sc-classical-mechanics-fall-2016/>
- Navarro Altamar, S. L. (2006). La resolución de problemas planteada como un proceso de investigación hacia la enseñanza de la física. *Prospectiva*, 4(2), 60–65. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=496251108010>



- Perales Palacios, F. J. (1993). La resolución de problemas: Una revisión estructurada. *Enseñanza de las Ciencias. Revista de Investigación y Experiencias Didácticas*, 11(2), 170–178. <https://doi.org/10.5565/rev/ensciencias.4533>
- Rodríguez Fernández, L., Fernández Mena, A. L., Torres Magaña, M. P., Rodríguez Magaña, M. A., & Rodríguez Fernández, M. A. (2024). Inteligencia artificial en la educación: Modelo de lenguaje de gran tamaño (LLM) como recurso educativo. *Revista Ipsumtec*, 7(2), 157–164. <https://doi.org/10.61117/ipsumtec.v7i2.321>
- Sato, K. (2024). Exploring the educational landscape of AI: Large language models' approaches to explaining conservation of momentum in physics. *arXiv*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2407.05308>
- Xu, X., Xu, Q., Xiao, T., Chen, T., Yan, Y., Zhang, J., Diao, S., Yang, C., & Wang, Y. (2025). UGPhysics: A comprehensive benchmark for undergraduate physics reasoning with large language models. *Proceedings of Machine Learning Research*, 267, 69849–69877.
- Zhang, X., Dong, Y., Wu, Y., Huang, J., Jia, C., Fernando, B., Shou, M. Z., Zhang, L., & Liu, J. (2025). PhysReason: A comprehensive benchmark towards physics-based reasoning. In *Proceedings of the 63rd Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics (Volume 1: Long Papers)* (pp. 16593–16615). Association for Computational Linguistics. <https://doi.org/10.18653/v1/2025.acl-long.811>
- Zhao, J., Tong, J., Mou, Y., Zhang, M., Zhang, Q., & Huang, X. (2024). Exploring the compositional deficiency of large language models in mathematical reasoning through trap problems. In *Proceedings of the 2024 Conference on Empirical Methods in Natural Language Processing* (pp. 16361–16376). Association for Computational Linguistics. <https://doi.org/10.18653/v1/2024.emnlp-main.915>





Caracterización estructural del manglar en el área occidental del Golfo de Montijo, Pacífico panameño

Structural characterization of the mangrove in the western area of the Gulf of Montijo, Panamanian Pacific

Rosa G. Castellero

Universidad de Panamá, Centro Regional Universitario de Veraguas, Centro de Capacitación, Investigación y Monitoreo de la Biodiversidad, Panamá.

rosa-1110@hotmail.com

<https://orcid.org/0000-0002-5184-5287>

Ángel Javier Vega

Universidad de Panamá, Centro Regional Universitario de Veraguas, Centro de Capacitación, Investigación y Monitoreo de la Biodiversidad, Panamá.

angel.vega@up.ac.pa

<https://orcid.org/0000-0002-9535-3348>

Autor de correspondencia

Yolani A. Robles

Universidad de Panamá, Centro Regional Universitario de Veraguas, Centro de Capacitación, Investigación y Monitoreo de la Biodiversidad, Panamá.

yolany.robles@up.ac.pa

<https://orcid.org/0000-0003-4140-9235>

Fecha de recepción: 9 de mayo de 2025

Fecha de aceptación: 12 de marzo de 2026

DOI: <https://doi.org/10.48204/j.tecno.v8n2.a10865>

RESUMEN

Entre septiembre y octubre de 2023 se llevó a cabo la caracterización de la estructura del manglar en tres sitios ubicados en el sector occidental del Golfo de Montijo. Para este propósito, se establecieron nueve cuadrantes de 10 x 10 m, distribuidos a intervalos de 50 metros cada uno. En cada cuadrante se identificaron las especies presentes y se midieron la altura y el diámetro a la altura del pecho (DAP) de todos los árboles cuyo DAP superaba los 2.5 cm. Con estos datos, se calculó el área basal (AB), el volumen y la densidad. Se identificaron tres especies, siendo *Pelliciera rhizophorae* (mangle piñuelo) la más abundante con 64.7 %, *Rhizophora mangle* (mangle rojo) 28.2 % y *Rhizophora racemosa* (mangle caballero) 7.1 %. La mayoría de las alturas y DAP se registraron entre 4-6 m y 3-10 cm, respectivamente. Brinzal fue la clase diamétrica predominante. Se detectó



tala selectiva de *Pelliciera rhizophorae*. El estudio amplía la información sobre los manglares del occidente del Golfo de Montijo.

PALABRAS CLAVE

Estuario, manglares, Río Caté, Río San Andrés, Río Cañazas

ABSTRACT

Between September and October 2023, a characterization of mangrove structure was carried out at three locations in the western part of the Gulf of Montijo. For this purpose, nine quadrants of 10 x 10 m were distributed at distances of 50 meters each. In each quadrant, an inventory of the species present was carried out and the height and Diameter at Breast Height (DBH) were measured for all trees exceeding 2.5 cm in DBH. From the recorded data set, Basal Area (BA), volume, and density were calculated. Three species were identified, with *Pelliciera rhizophorae* (tea mangrove) being the most abundant at 64.7%, *Rhizophora mangle* (red mangrove) at 28.2%, and *Rhizophora racemosa* (gentleman giant mangrove) at 7.1%. The highest frequency of height and DBH was found between 3 and 10 cm and between 4 and 6 m, respectively. The most abundant diameter category was seedling. Human intervention was observed, evidenced by targeted cutting towards *Pelliciera rhizophorae* trees. This study helps strengthen the database on mangroves in the western area in the Gulf of Montijo.

KEYWORDS

Estuary, mangroves, Caté River, San Andrés River, Cañazas River

INTRODUCCIÓN

El manglar es un bosque que crece en zonas salinas y conecta hábitats terrestres con comunidades marinas (Sierra-Paz, 2018). Las especies vegetales que crecen en estos ambientes poseen adaptaciones morfológicas, reproductivas y fisiológicas que les permiten sobrevivir en este tipo de ambiente (Ortiz-Reyes *et al.*, 2018).

Los manglares cumplen una función esencial al aportar numerosos servicios ambientales. Actúan como pulmones naturales, albergan una amplia gama de organismos, incluidos moluscos, crustáceos y peces, y ofrecen refugio temporal a numerosas aves migratorias (Del Cid-Perén, 2022). Además, funcionan como sistemas naturales de amortiguamiento contra inundaciones e intrusión salina, previenen la erosión de las costas y remueven nutrientes y toxinas (Calderón *et al.*, 2009).

La estructura del manglar es un indicador fundamental de su conservación (Rodríguez *et al.*, 2012) y comprenderla es clave para gestionar, conservar y optimizar los servicios ambientales que ofrece este ecosistema (Agudelo *et al.*, 2015). La distribución, composición y estructura de los manglares dependen del clima latitudinal (temperatura y precipitación) y



de factores locales como geomorfología, sustrato, salinidad e inundaciones (López-Portillo y Ezcurra, 2002).

En Panamá se han realizado investigaciones sobre manglares, incluyendo su estructura y dinámica en Punta Galeta (Sousa, 2007), nutrientes presentes (Lovelock *et al.*, 2005; Dangremond y Feller, 2014), composición y biomasa en el Archipiélago de las Perlas y Golfo de Montijo (McGowan *et al.*, 2010; Gross *et al.*, 2014), características del mangle rojo en isla Payardi, Caribe panameño (Garcés y Lozano, 2021) y la caracterización geomorfológica y estructural en Pixvae, Golfo de Chiriquí (Castillero *et al.*, 2023).

El propósito de este estudio es ampliar el conocimiento existente sobre los manglares de Panamá, evaluando las características estructurales y funcionales en el manglar ubicado en el sector occidental del Área de Recursos Manejados Humedal Golfo de Montijo.

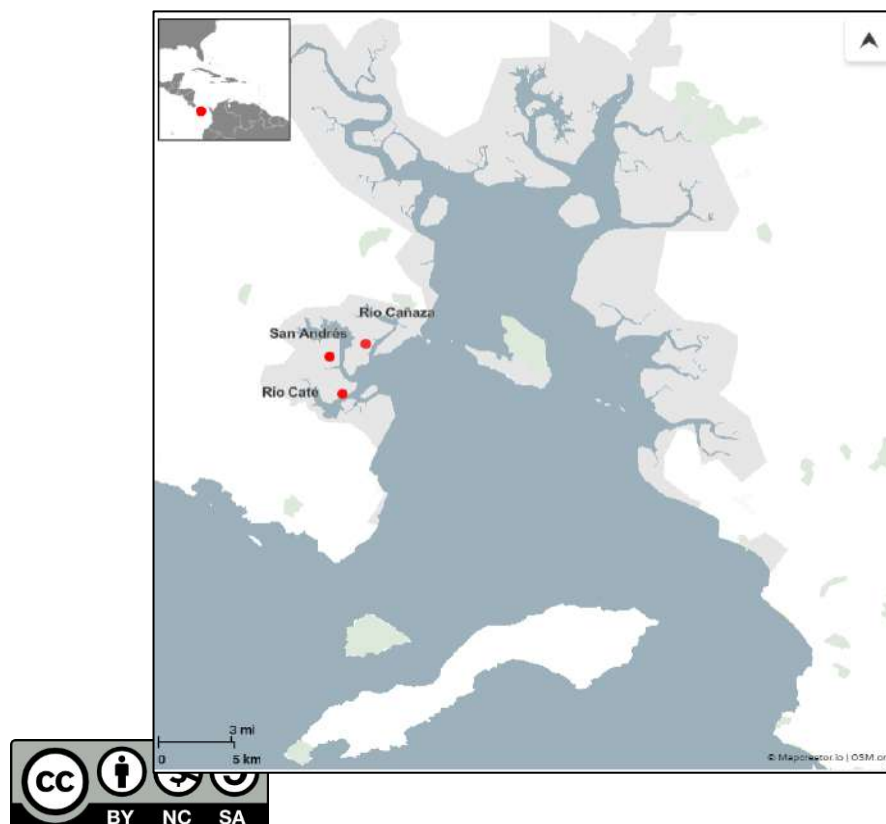
MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

El área de estudio comprende los manglares localizados entre las desembocaduras de los ríos Caté, Cañazas y San Andrés, en el Golfo de Montijo, Pacífico panameño (Figura 1).

Figura 1

Representación geográfica de los sitios de muestreo en el manglar del área occidental del Golfo de Montijo



El Golfo de Montijo es un humedal de importancia internacional y forma parte del Sistema Nacional Áreas Protegidas, bajo la categoría de Área de Recursos Manejados Humedal Golfo de Montijo. Se localiza al occidente de costa Pacífica panameña en la provincia de Veraguas (García *et al.*, 2023). Esta zona es un humedal, formado por un estuario poco profundo cuya desembocadura, hacia el sur, conecta con un mar profundo. Recibe influencias tanto del litoral como del océano Pacífico, creando una franja de transición entre las aguas dulces y saladas, suelos intermareales y áreas firmes (Fundación MarViva, 2021).

El Golfo de Montijo cuenta con un ecosistema de manglar bien conservado y funciona como zona de amortiguamiento del Parque Nacional Coiba (PNC) (García *et al.*, 2023). Entre las especies presentes se encuentran *Pelliciera rhizophorae*, *Rhizophora mangle*, *Rhizophora racemosa*, *Avicennia germinans*, *Laguncularia racemosa* y una especie asociada, *Mora oleifera* (Cámara *et al.*, 2004).

Las condiciones oceanográficas aumentan de forma lineal hacia el exterior del Golfo en superficie y fondo. Las características del estuario varían en dependencia de la temporada, muy influenciadas por la presencia o ausencia de lluvias, ya que modifican el comportamiento de las variables oceanográficas, tales como la temperatura, salinidad, pH y transparencia (Vega *et al.*, 2004). La temperatura del agua se mantiene alta, con variaciones entre 27.1 y 28 °C. El oxígeno disuelto es muy variable, con valores muy bajos (<1 mg/L) en el norte y noroeste, y otras con bajos niveles en el suroeste (García *et al.* 2023).

Atributos estructurales

Entre septiembre y octubre de 2023, se llevaron a cabo muestreos en tres sitios: Caté, Isla Diablo (San Andrés) e Isla Tillo (Rio Cañazas). En cada sitio se delimitaron tres parcelas de 10 x 10 metros, separadas entre sí por 50 metros, sumando un total de nueve parcelas. La altura de todos los árboles se midió con un hipsómetro Forestry Pro II de la marca Nikon. Para *Pelliciera rhizophorae*, se registró la circunferencia a 1.30 m de altura, mientras que, para *Rhizophora racemosa* y *Rhizophora mangle*, las mediciones se realizaron a 30 cm por encima de la raíz aérea más alta, siguiendo el protocolo de Kauffman *et al.* (2013). Este valor fue convertido a diámetro (DAP) al dividirlo por π . Para los análisis, únicamente se incluyeron árboles con un DAP superior a 2.5 cm.

En los análisis se incluyeron únicamente aquellos árboles cuyo DAP superaba los 2.5 cm (Rodríguez *et al.*, 2012). Se calculó el área basal (AB), densidad y volumen (Valdez-Hernández, 2004). Los árboles se clasificaron según diámetro: brinzales (2.5-5.0 cm), latizales (5.1-10 cm) y fustales (>10.1 cm) (Cintrón-Molero & Schaeffer-Novelli, 1992).

En cada sitio, se contaron plántulas en dos subcuadrantes de 1 m² por cuadrante, registrando árboles menores de 2.5 cm de diámetro según PNUD y MiAmbiente (2017).



Adicionalmente, se registró la temperatura (°C), salinidad (UPS) y el pH del agua superficial en los tres sitios de muestreo con el uso de una sonda multiparamétrica marca Hanna modelo HI 9829. Se utilizó la prueba de Kruskal-Wallis para evaluar las diferencias en las características estructurales entre las especies por cuadrantes, para un $\alpha = 0.05$ (Zar, 2009). El análisis de los datos se realizó mediante el software IBM SPSS Statistics.

RESULTADOS

La temperatura no superó los 31 °C y la salinidad se mantuvo por debajo de los 21 UPS. En cuanto al pH, los valores fueron básicos, con un promedio de 7.9 (Tabla 1). Solo la temperatura mostró diferencias significativas entre cuadrantes ($H = 26.55$, $p = 0.000$).

Tabla 1

Valores promedio de temperatura, salinidad y pH en los tres sitios de muestreo

Sitio	T (°C)	S (UPS)	pH
Caté	29.3	21.8	7.92
Isla Tillo (San Andres)	31.2	19.4	7.58
Isla Diablo (Río cañazas)	30.4	19.62	8.12

El primer sitio, formado por manglares cerca del río Caté, tiene un sustrato fangoso e inestable. En Isla Tillo, el sustrato es más estable, arenoso y con rocas; allí se observó tala selectiva de *P. rhizophorae* (8-10 cm de diámetro). En Isla Diablo predomina un sustrato firme de lodo y rocas. En todos los sitios se extrae *A. tuberculosa* (concha negra).

En el estudio se identificaron tres especies de mangle: *P. rhizophorae* (mangle piñuelo), que constituyó el 64,7 %; *R. mangle* (mangle rojo), con un 28,2 %; y *R. racemosa* (mangle caballero), con un 7,1 %. La especie *P. rhizophorae* se halló en sustratos fangosos estables y areno-fangosos, mientras que la presencia de *R. mangle* se relacionó con sustratos fangosos estables con rocas, y *R. racemosa* se vinculó a sustratos fangosos inestables.

La mayoría de los árboles tenían entre 3 y 10 cm de DAP; los de mayor DAP fueron menos frecuentes (Figura 2). Solo Caté no presentó las tres categorías diamétricas; allí predominó la categoría fustal, en Isla Diablo el latizal y en Isla Tillo el brinzal (Figura 3). Se registraron plántulas únicamente en Isla Tillo para *R. mangle*, con 2 plántulas/m².



Figura 2

Distribución de los diámetros de los árboles en el manglar del área occidental del Golfo de Montijo, Pacífico panameño

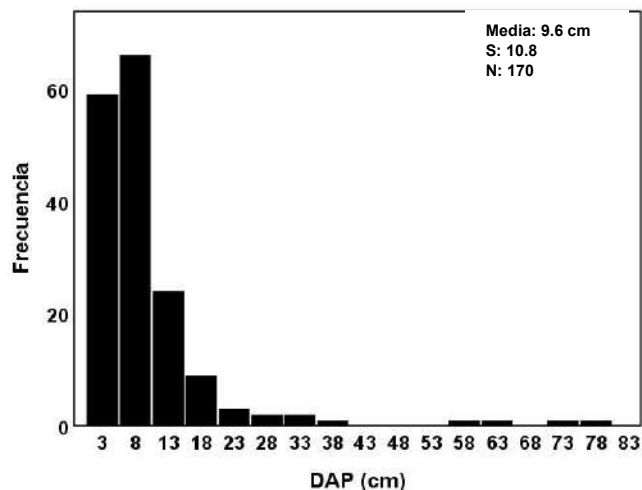
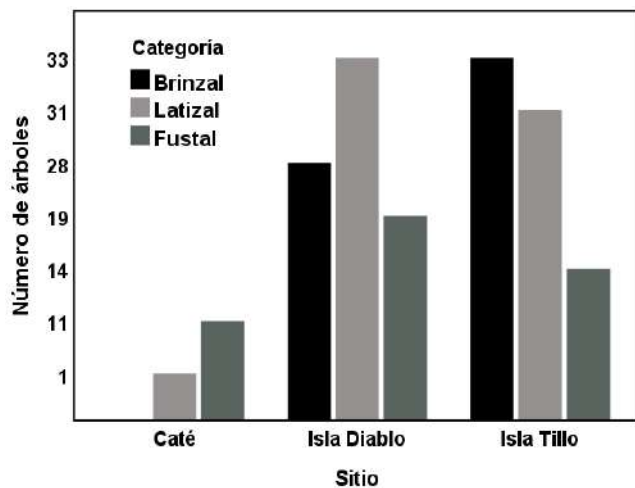


Figura 3

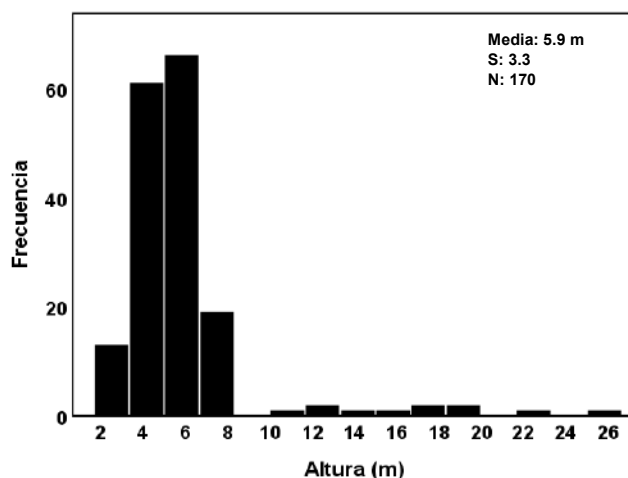
Categorías diamétricas de los árboles en el manglar del área occidental del Golfo de Montijo, Pacífico panameño. Rio Caté, Isla Diable (San Andrés), Isla Tillo (rio Cañazas)



La mayoría de los árboles tenían alturas entre 4 y 6 metros, aunque también se observaron ejemplares que superaban los 10 metros, pertenecientes a la especie *R. racemosa* (Figura 4).

Figura 4

Distribución de alturas de los árboles en el manglar del área occidental del Golfo de Montijo, Pacífico panameño



Se encontró diferencias en el AB ($H = 3.67$, $p = 0.05$) y en la densidad ($H = 5.03$, $p = 0.025$) para *P. rhizophorae*. Mientras que, *R. mangle* presentó diferencia en el DAP ($H = 20.51$, $p = 0.000$), AB ($H = 26.00$, $p = 0.000$), densidad ($H = 8.67$, $p = 0.003$) y volumen ($H = 19.79$, $p = 0.000$) (Tabla 2).

Tabla 2

Análisis comparativo de los atributos estructurales de las especies registradas en los tres sitios en el manglar del área occidental del Golfo de Montijo, Pacífico panameño

Especie	Parámetro	Sitios		
		Caté	San Andres	Rio Cañazas
<i>P. rhizophorae</i>	Altura (m)	.	5.6	5.1
	DAP (cm)	.	9.7	8.7
	AB (m ² /ha)	.	22.1	25.8
	V (m ³ /ha)	.	65.63	88.70
	D (árboles/ha)	.	2593	3927
<i>R. mangle</i>	Altura (m)	.	5	3.9
	DAP (cm)	.	4.1	3.1
	AB (m ² /ha)	.	3.8	1.5
	V (m ³ /ha)	.	11.38	3.95

	D (árboles/ha)	.	2708	1508.0
	Altura (m)	8.1	.	.
	DAP (cm)	17.8	.	.
<i>R. racemosa</i>	AB (m ² /ha)	44.5	.	.
	V (m ³ /ha)	564.4	.	.
	D (árboles/ha)	400.0	.	.

DAP: diámetro altura pecho, AB: área basal, V: Volumen, D: densidad

DISCUSIÓN

El manglar del Golfo de Montijo es de tipo ribereño, caracterizado por crecer en riberas de ríos, esteros y canales con flujo constante de agua dulce (Moreno-Casasola y Infante-Mata, 2016). Se identificaron tres especies de manglar, siendo *P. rhizophorae* la predominante. Gross *et al.* (2014) registraron *R. racemosa* y *A. germinans* en el Golfo de Montijo; esta última fue la más abundante en sustratos consolidados, especialmente en Isla Diablo, donde el sustrato es más estable. Según ANAM-ARAP (2013), *R. racemosa* crece principalmente en la desembocadura de ríos, bahías y esteros, y solo se detectó en Caté, cerca de la desembocadura del río Caté.

La composición de especies en los manglares depende del sustrato, la salinidad y la inundación (Flores-Verdugo *et al.* 2007; Barrantes-Leiva y Cerdas-Salas, 2014). En el sector occidental analizado, los tres sitios difieren en sustrato, nivel de inundación y elevación, lo cual se evidencia por las marcas de agua en los troncos. Isla Tillo es el de mayor altura, ya que se accede subiendo un montículo, a diferencia de los otros dos. Estas diferencias pueden influir en la presencia de especies distintas.

Este manglar tiene una distribución en J invertida, con más árboles de 2.5 a 10 cm de DAP, que corresponden a brinzales y latizales. Este resultado sugiere un considerable potencial de regeneración, aunque se observa una baja representación de árboles en las clases superiores (Hoyos *et al.*, 2013). Considerando que los árboles con mayor DAP son responsables de la principal producción de estructuras reproductivas (Orjuela-Rojas *et al.*, 2011), una disminución progresiva de estos ejemplares podría generar dificultades en la sucesión del bosque.

Los sitios con menor densidad presentaron árboles de mayor altura y DAP, mientras que los de mayor densidad tuvieron árboles más pequeños. Sol-Sánchez *et al.* (2014) indican que altas densidades reflejan presencia de individuos juveniles; por lo tanto, los árboles de Isla Tillo e Isla Caté serían juveniles y los de Caté, adultos.



Solo se registraron plántulas de *R. mangle* con una densidad de 2 plántulas/m² en Isla Tillo. Según Orjuela-Rojas et al. (2011), el sustrato y la inundación influyen en el establecimiento de plántulas, lo que explica su presencia o ausencia en los diferentes sitios. Los propágulos de *R. mangle* presentan menor mortalidad porque resisten bien la inundación, el oleaje y la brisa (Elster y Polanía, 2000). Aunque *P. rhizophorae* y *R. racemosa* pueden establecerse, factores como las mareas, los sedimentos y la salinidad reducen su supervivencia (Vargas-Fonseca, 2014).

La tala selectiva de *P. rhizophorae* en Isla Tillo responde a la preferencia por su madera resistente y duradera, empleada en la construcción de ranchos, como también observó Castellero et al. (2023) en Pixvae. El área donde se identifica esta actividad es frecuentemente visitada por extractores de concha, ya que se puede acceder fácilmente en lancha incluso con marea baja, lo cual facilita el aprovechamiento forestal.

CONCLUSIONES

El manglar del área occidental del Golfo de Montijo es un manglar tipo ribereño conformado por tres especies: *P. rhizophorae*, *R. mangle* y *R. racemosa*. Se caracteriza por tener un potencial de regeneración alto debido a la presencia de brinzales y latizales. Sin embargo, tiene presión antropogénica debido a la tala dirigida y selectiva hacia árboles de *P. rhizophorae* de 8 y 10 cm de DAP.

AGRADECIMIENTOS

Expresamos nuestra gratitud a la Secretaría Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación (SENACYT) por el apoyo financiero (Proyecto FID22-102) y a los pares revisores por su contribución al mejoramiento del manuscrito.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Agudelo, A., Bolívar, J., Polanía, J., Urrego, L., Yepes, A. y Sierra, A. (2015). Estructura y composición florística de los manglares de la bahía de Cispatá, Caribe colombiano. *Revista de Biología Tropical*, 63(4), 1137-1147.

[ANAM-ARAP] Autoridad Nacional del Ambiente y Autoridad de los Recursos Acuáticos de Panamá (2013). *Manglares de Panamá: Importancia, Mejores Prácticas y Regulaciones Vigentes*. Editora Novo Art, S.A, Panamá



- Barrantes-Leiva, R. M. y Cerdas-Salas, A. (2014). Distribución espacial de las especies de mangle y su asociación con los tipos de sedimentos del sustrato, en el sector estuarino del Humedal Nacional Terraba-Sierpe, Costa Rica. *Revista de Biología Tropical*, 63 (1), 47-60.
- Calderón, C., Oburto, O. y Ezcurra, E. (2009). El valor de los manglares. *Biodiversitas*, 82, 1-6.
- Camacho-Rico, A., Herrera-Silveira, J., Caamal-Sosa, J. P. y Teutli-Hernández, C. (2021). Influencia de la salinidad en el almacén y flujos de carbono en manglares de franja de una zona cárstica. *Madera y Bosques*, 27(4), 1-15.
- Cámara, R., Díaz, F., Martínez, R., Morón M., Gómez-Ponce, C., Tabares, E. y Vega, A. (2004). *Directrices de gestión para la conservación y desarrollo integral de un humedal centroamericano Golfo de Montijo (litoral del Pacífico, Panamá)*. Cooperación Española y Fundación para el Desarrollo Local y el Fortalecimiento Municipal e Institucional de Centroamérica y el Caribe (DEMUCA). República de Panamá.
- Castillero, R. G., Vega, A. J., Robles, Y. A. y Rivera, J. (2023). Caracterización geomorfológica, florística y estructural del manglar en la costa de Pixvae, Golfo de Chiriquí, Pacífico de Panamá. *Tecnociencia*, 25(1), 209-229.
- Cintrón-Molero, G. & Schaeffer-Novelli, Y. (1992). *Ecology and management of New World mangroves*. In Coastal plant communities of Latin America. Academic Press.
- Dangremond, E. M. & Feller, I. C. (2014). Functional traits and nutrient limitation in the rare mangrove *Pelliciera rhizophorae*. *Aquatic botany*. 116:1-7.
- Del Cid-Perén, F. A. (2022). Manglares en Panamá: Importancia, biodiversidad y medidas para su conservación. *Biocenosis*, 33(2), 17-27.
- Elster, C. y Polanía, J. (2000). Posibilidades de recuperación del manglar en la Ciénaga Grande de Santa Marta (Colombia). *Actual biol*, 22(72), 29-36.
- Flores-Verdugo, F., Moreno-Casasola, P., Agraz-Hernández, C., López-Rosas, H., Benítez-Pardo, D. y Travieso-Bello, A. C. (2007). La topografía y el hidroperíodo: dos factores que condicionan la restauración de los humedales costeros. *Bol.Soc.Bot.Méx.*, 80, 33-47.



- Fundación MarViva. (2021). *Atlas Marino-Costero del Humedal Golfo de Montijo, Panamá*. (Juan M. Posada y Antonio H. Clemente, Eds), Fundación MarViva, Ciudad de Panamá, Panamá.
- Garcés, H. y Lozano, J. (2021). Características estructurales del mangle rojo (*Rhizophora mangle*) en Isla Payardi, Colón, Panamá. *Tecnociencia*, 23(2), 5-15.
- García, A. L., Araúz, D., Martínez, E. & Molino, J. (2023). Environmental characterization of the estuarine zone of the Gulf of Montijo, province of Veraguas, Panama. *PLoS ONE*, 18 (6), 1-14.
- Gross, J., Flores, E. E. & Schwendenmann, L. (2014). Stand structure and aboveground biomass of a *Pelliciera rhizophorae* mangrove forest, Gulf of Montijo Ramsar site, Pacific Coast, Panama. *Wetlands*, 34(1), 55-65.
- Hoyos, R., Estela-Urrego, L. y Lema, A. (2013). Respuesta de la regeneración natural en manglares del Golfo de Urabá (Colombia) a la variabilidad ambiental y climática intra-anual. *Revista de Biología Tropical*, 61(3), 1445-1461.
- Kathiresan, K. & Bingham, B. L. (2001). Biology of mangroves and mangrove Ecosystems. *Advances in Marine Biology*, 40, 81–251.
- Kauffman, J. B., Donato, D. C., & Adame, M. F. (2013). Protocolo para la medición, monitoreo y reporte de la estructura, biomasa y reservas de carbono de los manglares (Vol. 117). Cifor.
- Portillo, J. L., & Ezcurra, E. (2002). Los manglares de México: una revisión. *Madera y bosques*, 8(Es1), 27-51.
- Lovelock, C. E., Feller, I. C., McKee, K. L. & Thompson, R. C. (2005). Variation in mangrove forest structure and sediment characteristics in Bocas del Toro, Panama. Caribbean. *Journal of Science*, 1(3), 456-464.
- Moreno-Casasola, P. y Infante-Mata, D. M. (2016). *Conociendo los manglares, las selvas inundables y los humedales herbáceos*.
- McGowan, T., Cunningham, S. L., Guzmán, H. M., Mair, J. M., Guevara, J. M. & Betts, T. (2010). Mangrove forest composition and structure in Las Perlas Archipelago, Pacific Panama. *Revista de Biología Tropical*, 58(3), 857-869.





Green precursor-assisted solid-state synthesis of LaFeO_3 perovskite: role of tannic acid on structural and magnetic properties

Síntesis en estado sólido de perovskita LaFeO_3 asistida por precursor verde: papel del ácido tánico en las propiedades estructurales y magnéticas

Fernando J. Higuera

Universidad de Panamá, Departamento de Física, Panamá

fernando-j.higuera@up.ac.pa

<https://orcid.org/0009-0009-0407-4721>

Juan A. Jaén

Universidad de Panamá, Departamento de Química, Panamá.

juan.jaen@up.ac.pa

<https://orcid.org/0000-0001-7069-216X>

Fecha de recepción: 8 de enero de 2026

Fecha de aceptación: 11 de mayo de 2026

DOI: <https://doi.org/10.48204/j.tecno.v8n2.a10869>

ABSTRACT

LaFeO_3 was synthesized via a low-energy solid-state route using commercial and tannic-acid-derived hematite as Fe precursors under identical processing (8 h milling + calcination at 800°C for 20 h, followed by 5 h post-milling), producing four samples. XRD confirms predominantly orthorhombic LaFeO_3 (Pnma) in all cases, with residual hematite; the green-precursor samples show lower conversion and minor residual La_2O_3 . Post-milling induces crystallite refinement and increased microstrain in all samples, with the green-precursor material exhibiting smaller crystallites (≈ 79 nm vs ≈ 91 nm) and more pronounced microstrain, reflecting its initially heterogeneous reaction pathway. Mössbauer spectroscopy shows a single LaFeO_3 sextet, with reduced intensity in the green-precursor samples, consistent with residual non-reacted regions. FTIR and XPS reveal organic-derived species only in these samples, while SEM shows agglomerated micrometric structures of nanosized particles, slightly smaller on average. Room-temperature M–H curves confirm weak ferromagnetic behavior, and ZFC–FC measurements display features associated with minor hematite and strong thermal irreversibility, attributed to uncompensated spins enhanced by milling.

KEYWORDS

LaFeO_3 ; Solid-state synthesis; Low-energy ball milling; Tannic acid; Mössbauer spectroscopy



RESUMEN

Se sintetizó LaFeO_3 mediante una ruta de estado sólido de baja energía utilizando hematita comercial y hematita derivada de ácido tánico como precursores de Fe bajo el mismo procesamiento (8 h de molienda + calcinación a 800°C durante 20 h, seguido de 5 h de post-molienda), produciendo cuatro muestras. La difracción de rayos X (XRD) confirma la presencia predominante de LaFeO_3 ortorrómbico (Pnma) en todos los casos, con hematita residual; las muestras del precursor verde muestran una menor conversión y una pequeña cantidad de La_2O_3 residual. La post-molienda induce el refinamiento de los cristalitos y un aumento de la microdeformación en todas las muestras, donde el material del precursor verde exhibe cristalitos más pequeños (≈ 79 nm frente a ≈ 91 nm) y una microdeformación más pronunciada, lo que refleja su vía de reacción inicialmente heterogénea. La espectroscopia Mössbauer muestra un único sextete de LaFeO_3 , con una intensidad reducida en las muestras del precursor verde, lo cual es consistente con las regiones residuales no reaccionadas. Las técnicas FTIR y XPS revelan especies derivadas de compuestos orgánicos solo en estas muestras, mientras que la microscopía electrónica de barrido (SEM) muestra estructuras micrométricas aglomeradas de partículas nanométricas, ligeramente más pequeñas en promedio. Las curvas M-H a temperatura ambiente confirman un comportamiento ferromagnético débil, y las mediciones ZFC-FC muestran características asociadas con la hematita minoritaria y una fuerte irreversibilidad térmica, atribuida a espines no compensados potenciados por la molienda.

PALABRAS CLAVE

LaFeO_3 ; Síntesis en estado sólido; Molienda de bolas de baja energía; Ácido tánico; Espectroscopia Mössbauer.

INTRODUCTION

A notable characteristic of this compound is that its functional properties depend strongly on the synthesis route (Koferstein et al., 2013; Kucharczyk et al., 2020; Ozkan et al., 2020; Popa & Moreno, 2010). Reported optical band gaps vary between 2.1 and 3.85 eV (Koferstein et al., 2013), specific surface areas from 2 to $30\text{ m}^2/\text{g}$ (Keav et al., 2014), and coercive fields from 853 Oe to 32 kOe (Koferstein et al., 2013; Naibaho et al., 2024; Prasad et al., 2024). Such wide ranges reflect differences in precursor chemistry and reaction pathways, arising from the large number of synthesis methods that have been studied for this compound, namely, sol-gel (Azouzi et al., 2019; Lebid & Omari, 2014; Ozkan et al., 2020), co-precipitation (Jadhav et al., 2006), and solid-state routes (Berbenni et al., 2018; Cristóbal et al., 2009; Lugo et al., 2021; Sorescu et al., 2011).

In parallel, the increasing demand for nanostructured oxides has intensified interest in synthesis routes that are more environmentally sustainable (Ahmad, 2014; Pasieczna-Patkowska et al., 2025). Many conventional physicochemical methods rely on high energy consumption or on organic solvents and chemical additives that may be difficult to handle and generate environmentally persistent residues (Pasieczna-Patkowska et al., 2025). In this context, plant-derived compounds have emerged as attractive alternatives, as they can act



simultaneously as chelating and reducing agents, potentially reducing both environmental impact and synthesis complexity (Herrera-Becerra et al., 2010; Pasieczna-Patkowska et al., 2025).

Among these bio-based precursors, tannic acid (TA), a plant polyphenolic compound capable of coordinating metal cations and promoting the formation of polymeric metal–organic networks, is particularly promising (Ahmad, 2014; Herrera-Becerra et al., 2010). It has already been employed in the synthesis of metallic and oxide nanoparticles, where it can influence reaction temperature and crystallite size by modifying nucleation and growth conditions (Ahmad, 2014; Finlay et al., 2012; Freire et al., 2023; Herrera-Becerra et al., 2010). However, despite its demonstrated utility in oxide synthesis, its effect on the formation pathway, resulting microstructure, and functional properties of LaFeO_3 remains largely unexplored.

In this work, we address this gap by combining a bio-derived iron precursor with a mild physical processing step. Hematite synthesized using tannic acid is employed as the Fe source, and a low-energy ball-milling treatment is introduced before calcination to homogenize the reagents while minimizing energy input. By comparing LaFeO_3 produced from tannic acid-derived hematite with that obtained from commercial hematite under identical processing conditions, we assess the impact of the bio-based precursor on phase formation, microstructure, and magnetic response, and evaluate its potential as a more sustainable route for LaFeO_3 synthesis

METHODOLOGY

Materials

Iron(III) nitrate nonahydrate ($\text{Fe}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$, 98%, Sigma-Aldrich) was used as the iron precursor. Tannic acid (CAS 1401-55-4, from Chinese natural gall nuts, Sigma-Aldrich) was employed as a complexing agent. Sodium hydroxide (NaOH , pellets, $\geq 98\%$, Merck Emplura) was used to adjust pH.

Commercial hematite (Fe_2O_3 , 97%, 25 μm , Panreac Applichem) and lanthanum oxide (La_2O_3 , 99.5%, 25 μm , Merck Emplura) were used for solid-state synthesis.

Synthesis of LaFeO_3

The green precursor was produced following (Freire, et al, 2023) by dissolving $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ in water (10 wt%), mixing it with a 0.1 wt% tannic acid solution, and stirring for 24 h to allow full complexation. The pH was then adjusted to 5 using NaOH solution (0.2 M), and the resulting precipitate was washed repeatedly by centrifugation to remove Na^+ . After drying for 15 h, the solid was calcined at 700 °C for 3 h, yielding Fe_2O_3 nanoparticles.



Both this precursor and commercial hematite were used to synthesize LaFeO_3 under identical solid-state conditions. Equimolar amounts of hematite and La_2O_3 were ball-milled in a planetary mill (FRITSCH Pulverisette 5) with methanol as dispersant and a 12:1 ball-to-powder mass ratio.

The milling and calcination parameters employed were established through a systematic optimization study previously conducted by our group, in which different milling durations and thermal treatments were evaluated while keeping the milling conditions (rotational speed, milling medium, and ball-to-powder ratio) fixed. These tests showed that 8 h of wet milling, followed by calcination at 800 °C for 20 h, yielded the highest LaFeO_3 phase fraction. The corresponding optimization study has been previously reported in detail (Jaén et al., 2026).

After calcination, all samples underwent an additional 5 h of dry milling under the same milling conditions to mitigate potential sintering and improve homogeneity. The resulting samples were labeled according to the precursor used and the application of the post-calcination milling step: ATLFO and ATLFO5 for samples obtained from tannic acid-derived hematite, and LFO and LFO5 for those synthesized from commercial hematite.

Characterization techniques

X-ray diffraction (XRD) patterns were collected using a Malvern Panalytical Aeris diffractometer equipped with a $\text{Co-K}\alpha$ source and a goniometer-type scanner. Data were acquired from 10° to 100° (2θ) with a step size of 0.022°. Phase identification was performed using HighScore Plus and the COD and PDF-2 databases, and quantitative analysis was carried out by Rietveld refinement in the same software.

FTIR spectra of ATLFO5 were acquired in transmission mode using a PerkinElmer Spectrum Two spectrometer (resolution: 0.2 cm^{-1} , 4000–400 cm^{-1}). The FTIR spectrum of LFO5 was obtained in ATR mode using a PerkinElmer Frontier system (resolution: 2 cm^{-1} , 4000–300 cm^{-1}). Atmospheric corrections were applied in both cases.

SEM images were obtained using a Thermo Scientific Quattro microscope (Thermo Fisher) operated in high vacuum. Both ETD and CBS detectors were used to record topographical and compositional contrast, respectively. Acceleration voltages of 10–20 kV, a spot size of 3, and a working distance of 4.8–4.9 mm were employed.

XPS spectra were recorded using a Specs NAP-XPS system with a PHOIBOS 150 1D-DLD analyzer and a monochromatic $\text{Al-K}\alpha$ source (1486.7 eV, 13 kV, 100 W). Survey spectra were collected with a 1 eV pass energy, and high-resolution spectra with 0.1 eV. A 3 eV, 20 μA charge neutralization was applied. Data processing was performed with CasaXPS.



Room-temperature Mössbauer spectra were collected using a CTS4 spectrometer (constant acceleration mode, 1024 channels) with a $^{57}\text{Co/Rh}$ source. Samples were prepared as 13 mm pellets containing 30–70 mg of powder diluted in sucrose. Velocity calibration was performed relative to $\alpha\text{-Fe}$. Hyperfine parameters were obtained using Recoil.

Magnetic measurements were carried out using a PPMS system (Quantum Design) with a VSM head. M–H loops were recorded at 300 K under vacuum (26 Torr) in an applied field of ± 20 kOe. M–T curves were acquired under ZFC and FC protocols from 5 to 300 K with an applied field of 200 Oe.

RESULTS

Structural analysis

XRD analysis

XRD measurements were carried out to evaluate the crystalline phases and structural features of the samples. Both the calcined and post-milled powders were analyzed. However, since the post-milled powders represent the final processed state for each synthesis route, most of the discussion focuses on LFO5 and ATLFO5. It should be noted that all diffraction patterns presented were normalized for visualization purposes; therefore, peak intensities are not directly comparable between samples.

The diffraction patterns of samples ATLFO and LFO are shown in Figure 1, and their corresponding refined parameters are listed in Table 1. Both samples crystallize predominantly in orthorhombic LaFeO_3 (Pnma, COD 1561805), exhibiting nearly identical lattice constants, cell volumes, and microstrain values, in agreement with the literature (Saha et al., 2020; Morales et al., 2016). The main difference between the two lies in phase purity: ATLFO contains 92.7% LaFeO_3 and retains measurable La_2O_3 , whereas LFO reaches 96.8% purity with no detectable lanthanum oxide.

Figure 1

Experimental diffraction pattern (black), fit (red), and identified phases in samples (a) ATLFO and (b) LFO.



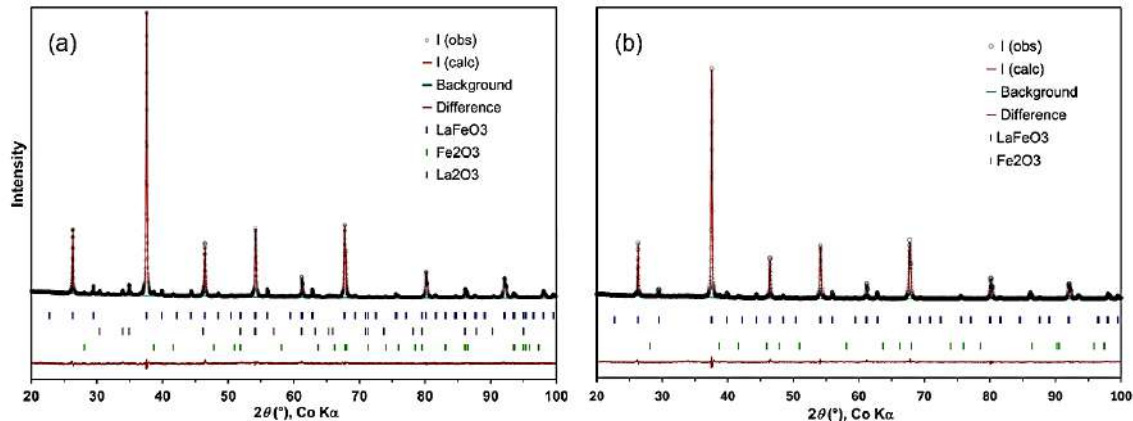


Table 1
Parameters derived from Rietveld analysis in samples ATLFO and LFO.

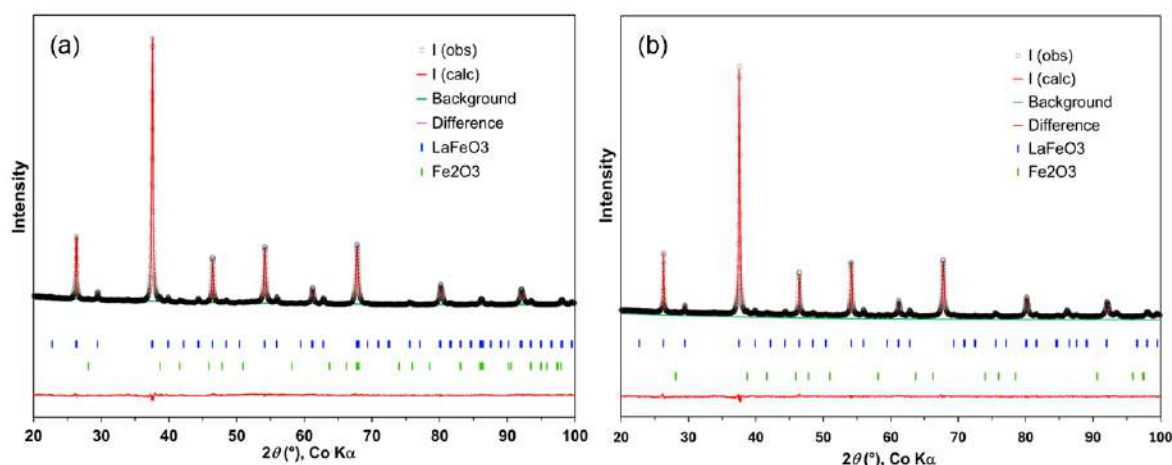
ATLFO				LFO		
Parameter	LaFeO ₃	Fe ₂ O ₃	La ₂ O ₃	Parameter	LaFeO ₃	Fe ₂ O ₃
a (Å)	5.5622(2)	5.036(2)	3.9394(8)	a (Å)	5.5638(2)	5.034(2)
b (Å)	7.8547(2)	5.036(2)	3.9394(8)	b (Å)	7.8546(2)	5.034(2)
c (Å)	5.5565(2)	13.743(6)	6.134(1)	c (Å)	5.5558(2)	13.753(6)
Volume (Å ³)	242.76(9)	-	-	Volume (Å ³)	242.799(9)	-
Phase %	92.7(1)	3.8(1)	3.5(3)	Phase %	96.8(5)	3.2(3)
Crystallite size (nm)	97(3)	—	—	Crystallite size (nm)	100(4)	—
Microstrain (%)	0.029(8)	—	—	Microstrain (%)	0.030(7)	—

The lower conversion in ATLFO is likely associated with the hematite precursor obtained from TA. Previous studies have shown that materials produced from this organic compound may retain carbonaceous surface residues (Finlay et al., 2012; Freire et al., 2023), which can hinder cation diffusion during calcination. Reduced ionic mobility would slow the formation of LaFeO₃, promoting the persistence of unreacted La₂O₃.

The diffraction patterns of the additional milled samples are shown in Figure 2, and their corresponding refined parameters are listed in Table 2.

Figure 2
Experimental diffraction pattern (black), fit (red), and identified phases in samples (a) ATLFO5 and (b) LFO5.





In both samples, milling increases microstrain without significantly altering lattice parameters or cell volume, indicating that the unit cell remains structurally stable. However, the effect of post-calcination milling is different. Although LFO5 shows only a moderate reduction in crystallite size and increased strain, ATLFO5 exhibits a significantly smaller crystallite size (≈ 79 nm) compared to LFO5 (≈ 91 nm) and a higher microstrain ($\approx 0.125\%$). This indicates that the LaFeO_3 obtained from hematite derived from TA is structurally more susceptible to mechanical refinement, which may be linked to the presence of precursor phases after calcination, resulting in a more heterogeneous, multiphasic microstructure with numerous internal interfaces that could act as weak mechanical regions during milling.

Table 2

Parameters derived from Rietveld analysis in samples ATLFO5 and LFO5

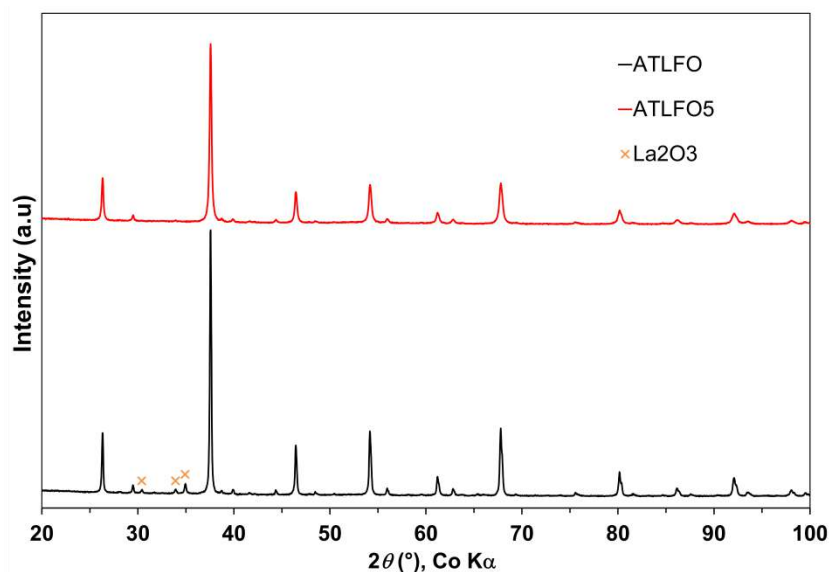
ATLFO5			LFO5		
Parameter	LaFeO_3	Fe_2O_3	Parameter	LaFeO_3	Fe_2O_3
a (Å)	5.5654(5)	5.036(3)	a (Å)	5.5622(4)	5.034(2)
b (Å)	7.8529(5)	5.036(3)	b (Å)	7.8553(5)	5.034(2)
c (Å)	5.5571(4)	13.75(1)	c (Å)	5.5561(3)	13.753(6)
Volume (Å ³)	242.87(2)	-	Volume (Å ³)	242.76(2)	-
Phase %	97.8(2)	2.2(1)	Phase %	97.6(1)	2.4(3)
Crystallite size (nm)	79(3)	-	Crystallite size (nm)	91.1(4)	-
Microstrain (%)	0.125(4)	-	Microstrain (%)	0.108(7)	-

In ATLFO5, the reflections associated with La_2O_3 disappear, but the overall peak intensity decreases noticeably, as shown in Figure 3.



Figure 3

Diffraction patterns of samples ATLFO (black) and ATLFO5 (red).



The milling conditions used here are far below the energies required for mechanochemical synthesis using bulk precursors (Cherkezova-Zheleva et al., 2014; Sorescu et al., 2011), so the disappearance of La_2O_3 reflections and the apparent increase in the LaFeO_3 fraction are interpreted as a consequence of reduced diffracting volume and enhanced microstrain in the crystallites induced by milling. These effects are known to broaden diffraction peaks, reduce their intensity, and may render minor phases undetectable by XRD (Suryanarayana, 2001). Similar behavior has been reported in mechanically milled La–Fe oxide systems, where progressive peak broadening and intensity reduction of La-containing precursor phases were associated with particle refinement (Sorescu et al., 2011).

Mössbauer

Room-temperature Mössbauer spectra of samples ATLFO5 and LFO5 are presented in Figure 4. In both cases, the data are well reproduced by a single Lorentzian sextet, whose hyperfine parameters, obtained from the fits, are summarized in Table 3.

Figure 4



Mössbauer spectrum of samples (a) ATLFO5 and (b) LFO5 at 300 K. Blue points are the measurements and the black line is the fit. The difference between the experimental and the fit is shown below the graph.

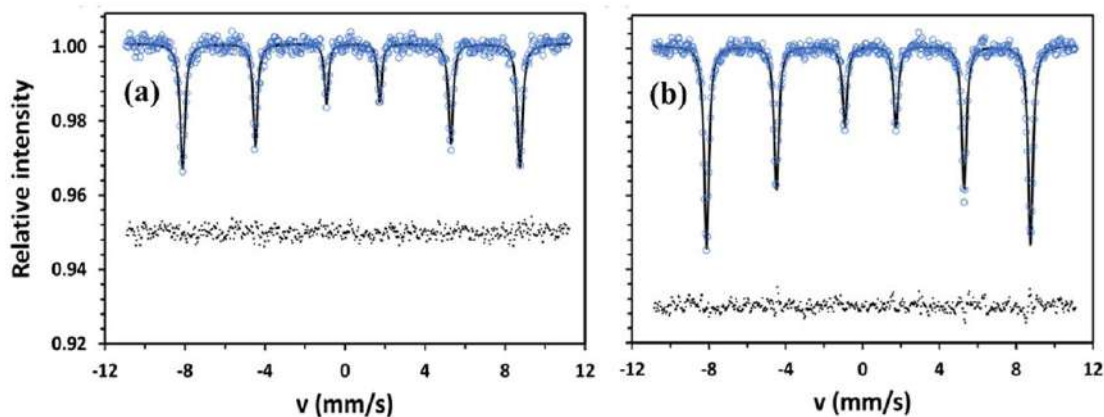


Table 3

Calculated hyperfine parameters obtained for samples ATLFO5 and LFO5. All parameters are given relative to metallic α -Fe.

Sample	Site	δ (mm/s)	ϵ (mm/s)	B_{hf} (T)	Γ (mm/s)	Population (%)	χ^2
ATLFO5	Sextet	0.36(5)	-0.04(5)	52.28(4)	0.24(4)	100	0.56
LFO5	Sextet	0.36(3)	-0.04(3)	52.31(2)	0.26(4)	100	0.76

These values match well with those reported for LaFeO_3 in the literature (Acosta et al., 2023; Al-Mamari et al., 2024; Lakshamana et al., 2019; Saha et al., 2020; Scrimshire et al., 2018). Both ATLFO5 and LFO5 show virtually identical isomer shifts ($\delta \approx 0.36$ mm/s), small quadrupole shifts ($\epsilon \approx -0.04$ mm/s), and large hyperfine fields ($B_{hf} \approx 52.3$ T) associated with the antiferromagnetic (AFM) coupling of LaFeO_3 . These values differ from those of hematite, which typically exhibits a larger quadrupole shift ($\epsilon \approx -0.21$ mm/s) and a slightly smaller hyperfine field ($B_{hf} \approx 51.7$ T) (Zboril et al., 2002).

Despite the presence of a hematite secondary phase detected by XRD in both samples, no additional Mössbauer components can be resolved at room temperature. The dominance of the LaFeO_3 sextet indicates that the magnetic contribution of hematite, if present, is too weak to produce a distinct sub-spectrum, likely due to its low fraction. Attempts to fit a



second sextet in both samples did not improve the statistical quality of the fit, despite the slight asymmetry observed in some of its outer lines.

It can be remarked, as seen in Figure 4, that the relative intensity of the LaFeO_3 Mössbauer component is lower in ATLFO5 compared to LFO5. This suggests a lower effective contribution of resonant Fe nuclei associated with the LaFeO_3 phase (Dickson & Berry, 2005), which may be related to the presence of impurities and/or non-reacted phases in the sample obtained from the green precursor.

Chemical composition and morphology

FTIR

FTIR measurements were performed to analyze the chemical composition of the obtained samples. Figure 5 presents the FTIR spectra of samples ATLFO5 and LFO5. Since the spectra were acquired under different measurement conditions, a direct comparison of position band intensities is not intended. In ATR-FTIR, it is quite common to observe shifts in some bands compared to transmitted FTIR. This occurs due to differences in the physical mechanism of radiation-sample interaction, the penetration depth of the evanescent wave, and scattering/refraction effects. In oxides, typical shifts range from a few cm^{-1} to $\sim 30 \text{ cm}^{-1}$, depending on the instrument, the ATR crystal, the preparation, and the particle size (Colthup et al., 1990; Griffiths & de Haseth, 2007; Salzer & Siesler, 2009). The analysis is thus restricted to identifying characteristic vibrational features.

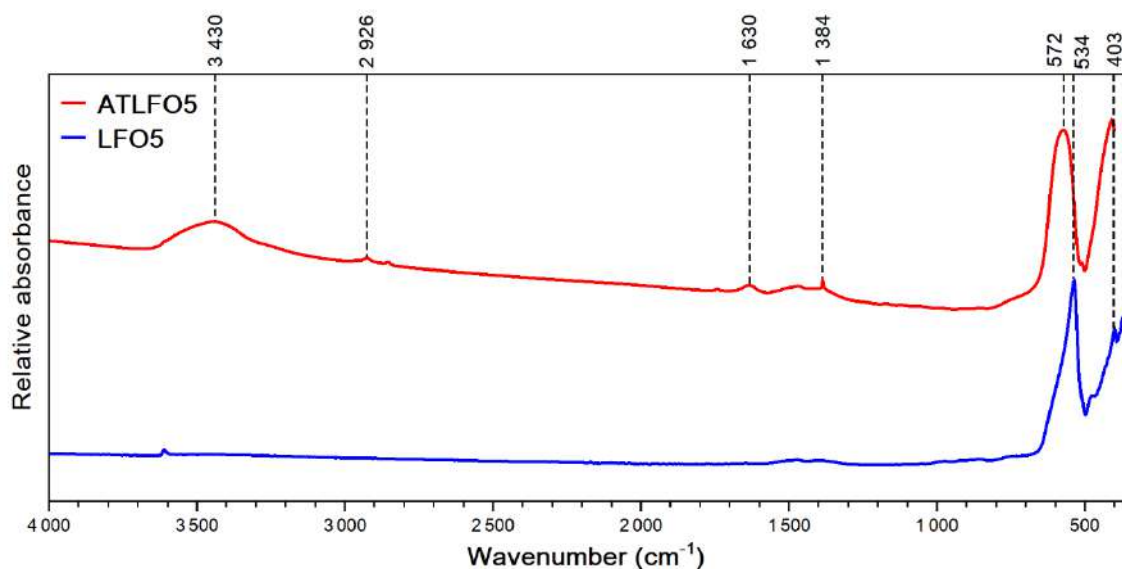
The LFO5 spectrum exhibits a simple and clean profile, dominated solely by two characteristic bands located around 403 and 534 cm^{-1} , associated with La-O-La , Fe-O-Fe , and Fe-O/La-O vibration modes characteristic of the perovskite structure of LaFeO_3 (Deng et al., 2019; Ozkan et al., 2020; Thuy & Minh, 2012; Vijayaraghavan et al., 2017). The ATLFO5 spectrum shows a slight blue shift of the Fe-O/La-O vibrational band, still within the range reported for samples synthesized from organic precursors “(Ozkan, et al., 2020)”. Additionally, weak features are observed that can be attributed to residual species derived from tannic acid, including bands near 3430 cm^{-1} (phenolic O-H or adsorbed water), $\sim 2926 \text{ cm}^{-1}$ (C-H stretching), $\sim 1630 \text{ cm}^{-1}$ (H-O-H bending), and $\sim 1384 \text{ cm}^{-1}$ (COO^- stretching) (Freire et al., 2023; Cherkezova-Zheleva et al., 2014; Vijayaraghavan et al., 2017, Pirtarighat et al., 2019; Barnawi et al., 2022; Ahmad et al., 2013; Radzikowska-Buchner et al., 2023). Despite their low intensity, the presence of these bands suggests that traces of precursor-derived species may remain after calcination.

Figure 5

FTIR spectrum of samples ATLFO5 (red) and LFO5 (blue)

193



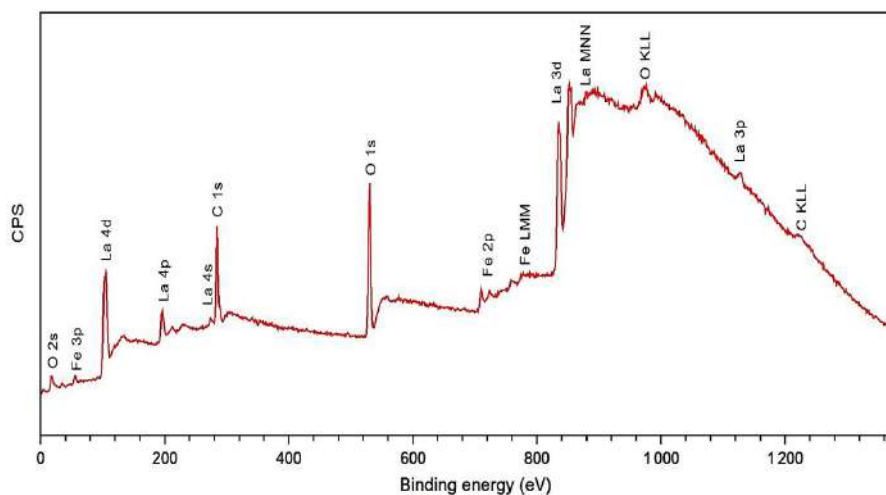


XPS

XPS measurements were performed to characterize the surface chemical states of sample ATLFO5. The analysis focused on ATLFO5 due to the residual species identified by FTIR and XRD in this sample. Figure 6 shows the survey spectrum of ATLFO5.

Figure 6

XPS survey spectrum of sample ATLFO5.

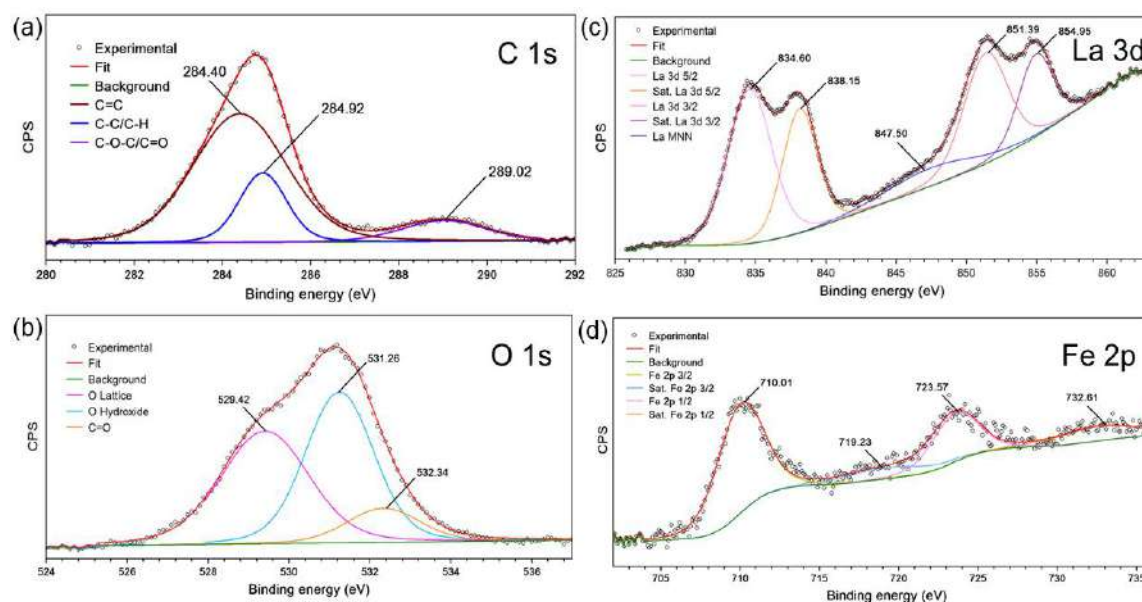


A first notable feature is the comparatively intense C 1s signal, which appears stronger than what is typically reported for LaFeO_3 prepared through other routes (Das et al., 2024; Ozkan et

al., 2020), where this line is usually attributed to adventitious carbon. To clarify the origin of this enhanced contribution, the high-resolution C 1s, O 1s, La 3d and Fe 2p spectra were examined in detail. The fitted spectra are presented in Figure 7.

Figure 7

Fitted high-resolution spectra of lines (a) C1s, (b) O1s, (c) La3d, and (d) Fe2p in sample ATLFO5.



The C 1s envelope (Figure 7a) can be deconvoluted into three components at approximately 284.4, 284.9, and 289.0 eV. The lowest-energy component is characteristic of aromatic C=C environments, the peak at ~284.9 eV corresponds to typical adventitious C–C/C–H species, and the component at ~289.0 eV lies within the binding-energy range of carbonyl-type groups (C=O or O–C=O) (Beamson & Briggs, 1992).

The O 1s spectrum of ATLFO5 can be deconvoluted into three components: a dominant peak at ~529.4 eV corresponding to lattice oxygen in LaFeO₃, a contribution at ~531.3 eV associated with surface hydroxyl groups, and a higher-binding-energy component at ~532.2–533.0 eV attributable to oxygen in C–O and C=O environments. The consistency between the C 1s and O 1s envelopes indicates the presence of residual carbon-containing species on the surface after calcination. Although XPS probes only the outermost few nanometers, these surface features suggest that organic-derived species were not completely removed and may have locally reduced the effective contact between La₂O₃ and Fe₂O₃ particles during calcination. Such an effect could contribute to incomplete reaction in some regions, thereby



explaining the lower phase purity observed for ATLFO compared to LFO.

The La 3d spectrum (Figure 7c) exhibits the characteristic La³⁺ doublet, with La 3d_{5/2} and La 3d_{3/2} peaks at ~834.5 and ~851.5 eV, accompanied by their corresponding satellite features at ~838 and ~855 eV characteristic of the presence of species of La³⁺ on the surface of the material (Deng et al., 2019; Ozkan et al., 2020). A weak La MNN Auger contribution is also visible near ~847–848 eV.

The Fe 2p region (Figure 7d) displays Fe 2p_{3/2} and Fe 2p_{1/2} components at ~710.0 and ~723.6 eV, characteristic of Fe³⁺ species (Deng et al., 2019), along with satellite features around ~719 and ~733 eV. No additional components attributable to Fe²⁺ or mixed-valence states are detected.

A slight shift of the Fe 2p_{1/2} peak with respect to typical LaFeO₃ values (Ozkan et al., 2020; Das et al., 2024) may reflect the contribution of the minor hematite phase identified by XRD.

SEM

SEM was used to examine the morphology and particle-size distribution of the calcined powders. Figure 8 shows representative micrographs of the ATLFO5 sample.

The material exhibits a relatively homogeneous morphology composed of micrometer-scale agglomerates and smaller, isolated particles, many of which are spherical or slightly spheroidal. A particle-size analysis carried out in region b (Figure 9) shows a distribution spanning approximately 40–200 nm, with the highest concentration between 60 and 140 nm. Fitting the histogram with a log-normal function yields an average particle size of 107.5 nm and a positively skewed (1,11) distribution.

Figure 8

Two different regions of sample (a,c) ATLFO5 and (b,d) their corresponding magnified views.



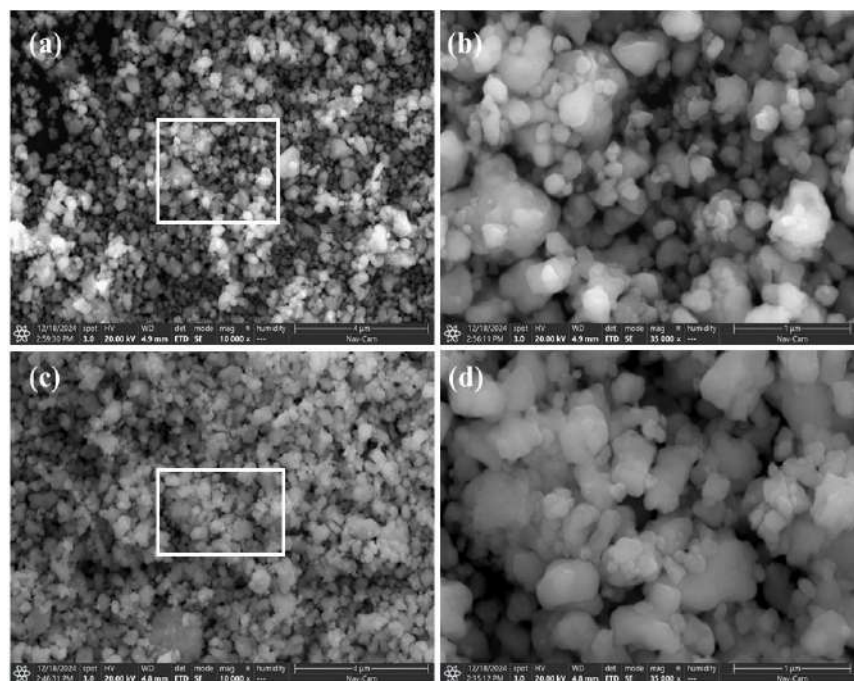


Figure 9
Particle length histogram of region b in Figure 8 in sample ATLFO5.

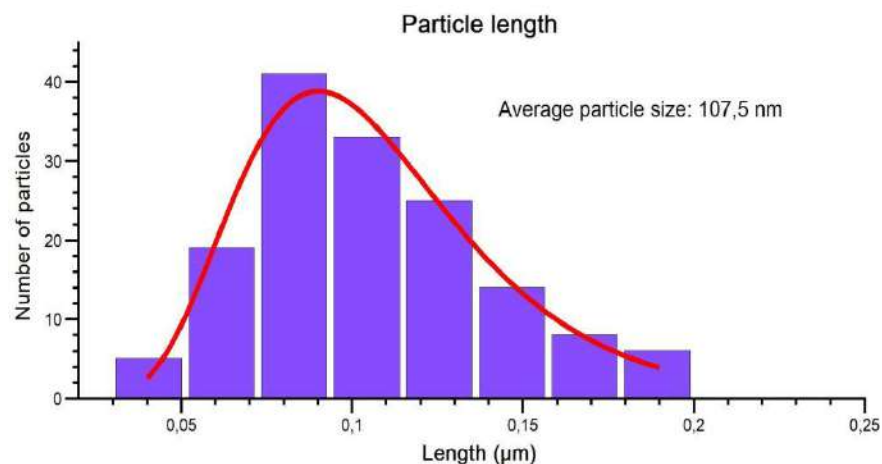
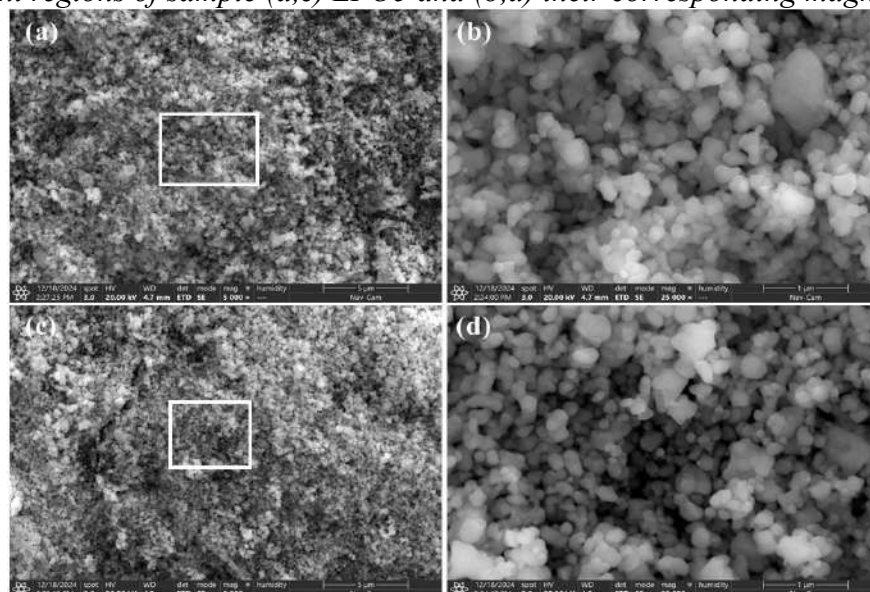


Figure 10 presents micrographs of LFO5, synthesized from commercial precursors. Its morphology is broadly similar to that of ATLFO5, but the particle-size distribution obtained from region d (Figure 11) is shifted toward larger sizes, ranging from 60 to 240 nm with an average of 126.1 nm and a slightly smaller positive skewness (0,974).

Figure 10

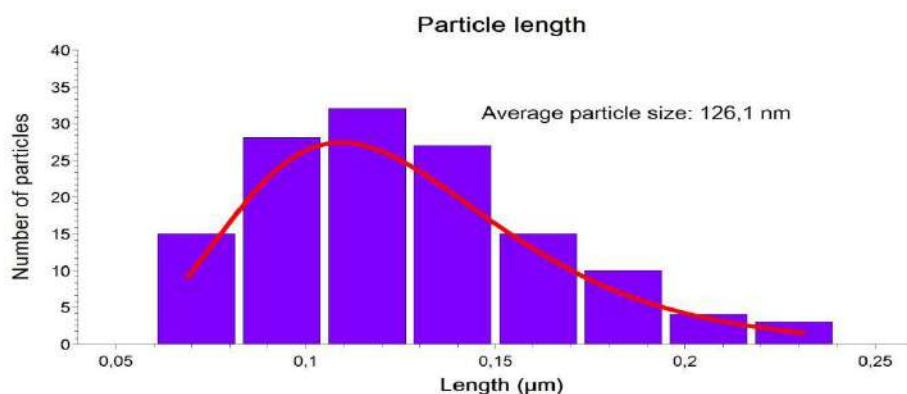
Two different regions of sample (a,c) LFO5 and (b,d) their corresponding magnified views.



Since LaFeO_3 formation has been proposed to occur mainly through the diffusion of La^{3+} into the Fe_2O_3 lattice (Sorescu et al., 2011), this size difference is likely related to the different grain sizes of the hematite precursors, since the tannic acid-derived hematite is known to be finer (Freire et al., 2023) than the commercial one.

Figure 11

Particle length histogram of region d in Figure 10 in sample LFO5.

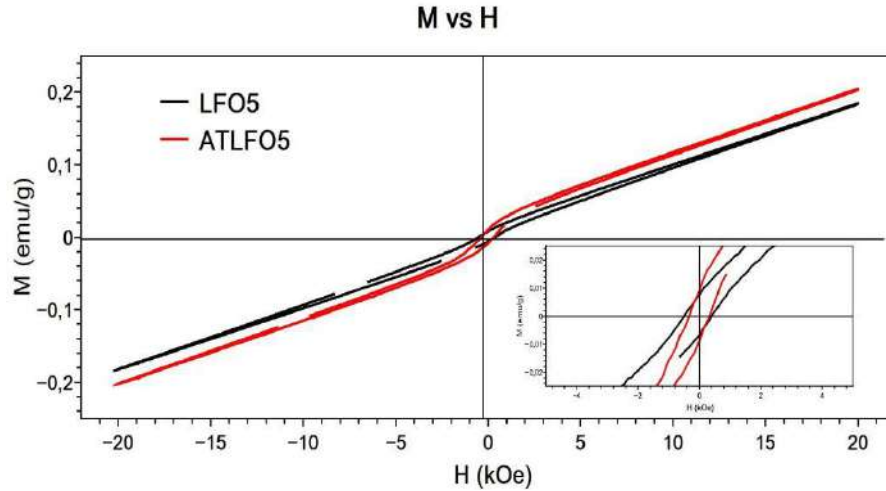


Magnetic measurements

To study the magnetic properties of the synthesized samples, Figure 12 shows the room-temperature M–H curves of samples ATLFO5 and LFO5.

Figure 12

Hysteresis loop at 300 K of samples ATLFO5 (red) and LFO5 (black). Inset is the magnified hysteresis loop.



Neither sample reaches magnetic saturation within the ± 20 kOe range; instead, it shows a nearly linear dependence characteristic of the AFM ordering in LaFeO_3 . The enlarged view near the origin reveals a small but finite remanent magnetization in both cases, indicating a weak ferromagnetic (WF) component. This behavior is consistent with the spin canting commonly reported in distorted orthoferrites (Abbas et al., 2018; Jain & Srivastava, 2016; Kundu et al., 2019; Popa & Moreno, 2010; Thuy & Minh, 2012).

Table 4

Remanent magnetization (M_r) and coercive field (H_c) for samples ATLFO5 and LFO5

Parameter	ATLFO5	LFO5
1M_r (emu/g)	0.008	0.007
	886	458
1H_c (Oe)	325	495

¹Values obtained from linear interpolation of the hysteresis data. The uncertainties are $\Delta M_r \approx \pm 3 \times 10^{-6}$ emu/g and $\Delta H \approx \pm 1$ Oe.



The overall magnetization is higher in ATLFO5 than in LFO5, a difference that can reasonably be attributed to microstructural factors. ATLFO5 contains a larger fraction of smaller particles, increasing the contribution of uncompensated surface spins, which are more easily aligned by the external field. Although both samples were subjected to dry milling, differences in the resulting surface disorder or defect density, combined with their distinct grain-size distributions, may also influence the magnetic response. Within this framework, ATLFO5 exhibits the largest magnetization because it combines a greater surface-to-volume ratio with defects-induced contributions associated with milling. The remanent magnetization values obtained by linear interpolation (Table 4) follow this trend, with ATLFO5 showing the highest M_r and LFO5 a slightly lower value.

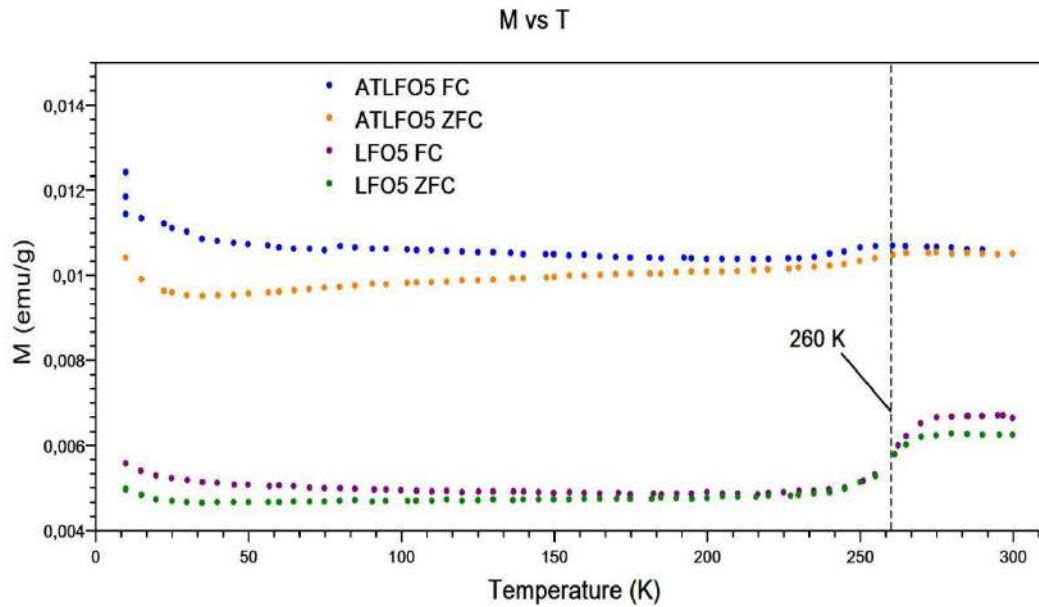
The coercive fields show relative low values, and differ between the soft behavior (Guimarães, 2017), differ between the two samples, with LFO5 exhibiting a higher coercivity (~ 495 Oe) than ATLFO5 (~ 325 Oe). Since both materials underwent identical post-milling conditions, this difference is primarily attributed to their distinct grain-size distributions. In LaFeO_3 , coercivity is known to depend on grain size and to reach a maximum at intermediate dimensions, around ~ 125 nm (Kofenstein et al., 2013). The particle-size distribution of LFO5 lies closer to this regime, whereas ATLFO5 contains a larger fraction of finer particles, resulting in a lower effective coercivity.

Figure 13 shows the ZFC and FC magnetization curves of samples ATLFO5 and LFO5. Both materials show a magnetic transition at ~ 260 K, a feature that is not expected for pure LaFeO_3 but is fully consistent with the Morin transition of the minor Fe_2O_3 phase detected by XRD (Ozdemir et al., 2008). The transition is noticeably sharper in LFO5, which can be attributed to the larger fraction of particles above the nanometric regime (>100 nm). In contrast, ATLFO5 exhibits a more diffuse transition, which can be associated with its larger fraction of nanoparticles. As particle size decreases, the surface-to-volume ratio increases and surface effects progressively dominate the magnetic anisotropy landscape, leading to a distribution of anisotropy energies (Kodama, 1999). This distribution spreads the Morin transition over a finite temperature range, producing the gradual behavior observed experimentally.

Figure 13

ZFC and FC curves of samples ATLFO5 (orange and blue) and LFO5 (green and purple)





A pronounced bifurcation between ZFC and FC curves is observed in both samples, beginning near room temperature, indicating strong thermal irreversibility. Upon cooling, the FC magnetization increases while the ZFC response remains significantly lower, a behavior commonly associated with uncompensated or weakly pinned spins. This effect is frequently interpreted within frameworks where surface regions contribute additional anisotropy and metastable spin configurations (Koferstein et al., 2013; Al-Mamari et al., 2024). In our materials, the presence of nanometric grains, together with the structural disorder induced by the dry milling step, enhances these contributions by introducing strain, defects, and locally frustrated exchange interactions.

As the temperature increases from the low-T region in ZFC, thermal activation gradually unblocks the surface spins, producing the expected rise in magnetization (Al-Mamari et al., 2024). A clear maximum cannot be identified because the Morin transition of the secondary Fe_2O_3 phase overlaps with this regime, and the ZFC–FC separation remains small but still observable above ~ 255 K.

CONCLUSIONS



LaFeO₃ perovskite was successfully synthesized by a low-energy solid-state route using both commercial hematite and hematite derived from tannic acid as iron precursors. Although all samples crystallized predominantly in the orthorhombic LaFeO₃ phase, clear differences in phase formation, microstructure and magnetic response were observed depending on the nature of the precursor.

The use of tannic acid-derived hematite led to a less complete solid-state reaction after calcination, as evidenced by the presence of residual La₂O₃ and a lower LaFeO₃ phase fraction compared to samples synthesized from commercial hematite. FTIR and XPS analyses revealed that organic-derived species persist in the green-precursor samples even after calcination at 800 °C. These residual carbonaceous species are proposed to hinder cation diffusion during calcination, slowing the formation of LaFeO₃ and resulting in a more heterogeneous reaction pathway.

Post-calcination milling increased microstrain and reduced crystallite size in all samples without significantly altering lattice parameters, confirming the structural robustness of the LaFeO₃ unit cell. However, the effect was more pronounced in the green-precursor material, which exhibited smaller crystallites and higher microstrain. This enhanced susceptibility to mechanical refinement is attributed to its initially heterogeneous and multiphasic microstructure, containing a larger density of internal interfaces that act as mechanically weak regions.

Magnetic measurements showed that all samples display antiferromagnetic behavior with a weak-ferromagnetic component at room temperature. The higher magnetization observed in the green-precursor sample after milling is consistently explained by its smaller particle size and increased surface-to-volume ratio, which enhances the contribution of uncompensated surface spins. ZFC–FC measurements further revealed a Morin transition associated with the minor hematite phase and strong thermal irreversibility, particularly pronounced in samples containing a higher fraction of nanometric grains.

Overall, this work demonstrates the viability of tannic acid as a bio-derived precursor in the solid-state synthesis of LaFeO₃, but at the cost of introducing persistent carbonaceous species that limit reaction completeness under mild thermal conditions. While this limits phase purity, it simultaneously promotes finer microstructures and enhanced magnetic response after mechanical refinement.

BIBLIOGRAPHIC REFERENCES



- Abbas, Y. M., Mansour, A. B., Ali, S. E. M., & Abdel-Hamid, A. H. I. (2018). Synthesis, structure and magnetic characterization of orthoferrite LaFeO₃ nanoparticles. *Journal of Advances in Physics*, 14(3), 5664–5681. <https://doi.org/10.24297/jap.v14i3.7693>
- Acosta, H., López, C. A., Furlong, O. J., Nazzarro, M. S., Marchetti, S. G., Cadús, L. E., & Agüero, F. N. (2023). Highly resistant LaCo_{1-x}Fe_xO₃ perovskites used in chlorobenzene catalytic combustion. *Catalysts*, 13(1), 42. <https://doi.org/10.3390/catal13010042>
- Ahmad, T. (2014). Reviewing the tannic acid mediated synthesis of metal nanoparticles. *Journal of Nanotechnology*, 2014, 1–11. <https://doi.org/10.1155/2014/954206>
- Ahmad, T., Wani, I. A., Manzoor, N., Ahmed, J., & Asiri, A. M. (2013). Biosynthesis, structural characterization and antimicrobial activity of gold and silver nanoparticles. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 107, 227–234. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2013.02.004>
- Al-Mamari, R. T., Widatallah, H. M., Elzain, M. E., Gismelseed, A. M., Al-Rawas, A. D., Al-Harthi, S. H., Myint, M. T. Z., Al-Saqri, N., & Al-Abri, M. (2024). Core and surface structure and magnetic properties of mechano-synthesized LaFeO₃ nanoparticles and their Eu³⁺-doped and Eu³⁺/Cr³⁺-co-doped variants. *Scientific Reports*, 14(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-024-65757-z>
- Arjun, N., Pan, G., & Yang, T. C. (2017). The exploration of lanthanum based perovskites and their complementary electrolytes for the supercapacitor applications. *Results in Physics*, 7, 920–926. <https://doi.org/10.1016/j.rinp.2017.02.013>
- Azouzi, W., Sigle, W., Labrim, H., & Benaissa, M. (2019). Sol-gel synthesis of nanoporous LaFeO₃ powders for solar applications. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 104, 104682. <https://doi.org/10.1016/j.mssp.2019.104682>
- Barnawi, N., Allehyani, S., & Seoudi, R. (2022). Biosynthesis and characterization of gold nanoparticles and its application in eliminating nickel from water. *Journal of Materials Research and Technology*, 17, 537–545. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.12.013>
- Beamson, G., & Briggs, D. (1992). *High resolution XPS of organic polymers: The Scienta ESCA300 database*. Wiley.
- Berbenni, V., Bruni, G., Milanese, C., Girella, A., & Marini, A. (2018). Synthesis and characterization of LaFeO₃ powders prepared by a mixed mechanical/thermal



- processing route. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 133(1), 413–419. <https://doi.org/10.1007/s10973-017-6878-z>
- Cherkezova-Zheleva, Z., Paneva, D., Yordanova, I., Shopska, M., & Kolev, H. (2014). Mechanochemical preparation and properties of nanodimensional perovskite materials. *Acta Physica Polonica A*, 126(4), 916–920. <https://doi.org/10.12693/aphyspola.126.916>
- Choi, J., Kim, B., Song, S., & Park, J. (2016). A composite cathode with undoped LaFeO₃ for protonic ceramic fuel cells. *International Journal of Hydrogen Energy*, 41(22), 9619–9626. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.03.115>
- Colthup, N. B., Daly, L. H., & Wiberley, S. E. (1990). *Introduction to infrared and Raman spectroscopy* (3rd ed.). Academic Press.
- Cristóbal, A., Botta, P., Bercoff, P., & López, J. P. (2009). Mechanochemical synthesis and magnetic properties of nanocrystalline LaFeO₃ using different iron oxides. *Materials Research Bulletin*, 44(5), 1036–1040. <https://doi.org/10.1016/j.materresbull.2008.11.015>
- Das, S., Das, S., Bajorek, A., & Chakrabarti, P. K. (2024). Enhanced magnetic behavior of LaFeO₃ by co-doping with Nd³⁺ and V⁵⁺ substitution (La_{0.8}Nd_{0.2}Fe_{0.95}V_{0.05}O₃). *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 606, 172333. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2024.172333>
- Deng, H., Mao, Z., Xu, H., Zhang, L., Zhong, Y., & Sui, X. (2019). Synthesis of fibrous LaFeO₃ perovskite oxide for adsorption of Rhodamine B. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 168, 35–44. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2018.09.056>
- Dickson, D. P. E., & Berry, F. J. (1986). *Mössbauer spectroscopy*. Cambridge University Press.
- Finlay, C., Gunawan, G., Biris, A. S., Bourdo, S., Kunets, V., Salamo, G., & Viswanathan, T. (2012). Novel microwave-assisted synthesis of renewable-resource based carbon-magnetite nanocomposites. *Journal of Wood Chemistry and Technology*, 32(3), 268–278. <https://doi.org/10.1080/02773813.2012.659320>
- Freire, A., Chung, E., Mendoza, I., & Jaén, J. A. (2023). Green synthesis of iron oxide nanoparticles using *Caesalpinia coriaria* (Jacq.) Willd. fruits extract. *Hyperfine Interactions*, 244(1). <https://doi.org/10.1007/s10751-023-01817-6>
- Griffiths, P. R., & de Haseth, J. A. (2007). *Fourier transform infrared spectrometry* (2nd ed.). Wiley.



- Guimarães, A. P. (2017). *Principles of nanomagnetism*. In *Nanoscience and technology*. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-59409-5>
- Herrera-Becerra, R., Rius, J. L., & Zorrilla, C. (2010). Tannin biosynthesis of iron oxide nanoparticles. *Applied Physics A*, 100(2), 453–459. <https://doi.org/10.1007/s00339-010-5903-x>
- Jadhav, A., Gaikwad, A., Samuel, V., & Ravi, V. (2006). A low temperature route to prepare LaFeO₃ and LaCoO₃. *Materials Letters*, 61(10), 2030–2032. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2006.08.009>
- Jaén, J. A., Higuera, F., Gil, O., Chung, E., & Caballero-Manrique, G. (2026). Synthesis and characterisation of perovskite-type LaFeO₃ using solid-state reaction assisted by low-energy ball milling. *Interactions*, 247(1). <https://doi.org/10.1007/s10751-026-02434-9>
- Jain, P., & Srivastava, S. (2016). Structural investigation and zero-field-cooled exchange bias in nanocrystalline LaFeO₃. *Journal of Superconductivity and Novel Magnetism*, 29(8), 2089–2097. <https://doi.org/10.1007/s10948-016-3520-4>
- Keav, S., Matam, S., Ferri, D., & Weidenkaff, A. (2014). Structured perovskite-based catalysts and their application as three-way catalytic converters—A review. *Catalysts*, 4(3), 226–255. <https://doi.org/10.3390/catal4030226>
- Kodama, R. (1999). Magnetic nanoparticles. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 200(1–3), 359–372. [https://doi.org/10.1016/S0304-8853\(99\)00347-9](https://doi.org/10.1016/S0304-8853(99)00347-9)
- Koferstein, R., Jäger, L., & Ebbinghaus, S. G. (2013). Magnetic and optical investigations on LaFeO₃ powders with different particle sizes and corresponding ceramics. *Solid State Ionics*, 249–250, 1–5. <https://doi.org/10.1016/j.ssi.2013.07.001>
- Kucharczyk, B., Winiarski, J., Szczygieł, I., & Adamska, K. (2020). Physicochemical properties of LaFeO₃ perovskite prepared by various methods and its activity in the oxidation of hydrocarbons. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 59(38), 16603–16613. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.0c03035>
- Kuhn, J., & Ozkan, U. (2007). Surface properties of Sr²⁺ and Co-doped LaFeO₃. *Journal of Catalysis*, 253(1), 200–211. <https://doi.org/10.1016/j.jcat.2007.10.005>
- Kundara, R., & Baghel, S. (2024). Performance analysis of LaFeO₃ perovskite solar cells: A theoretical and experimental study. *Solid State Communications*, 389, 115590. <https://doi.org/10.1016/j.ssc.2024.115590>



- Kundu, S. K., Rana, D. K., Karmakar, L., Das, D., & Basu, S. (2019). Enhanced multiferroic, magnetodielectric and electrical properties of Sm doped lanthanum ferrite nanoparticles. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 30(11), 10694–10710. <https://doi.org/10.1007/s10854-019-01415-9>
- Lakshamana, T., Pradhan, M. K., Chandrasekhar, M., Ramakrishna, P. V., & Dash, S. (2019). Structural, magnetic, grain and grain boundary mediated conduction features of low dimensional LaFeO₃ nanoparticles. *Journal of Physics: Condensed Matter*, 31(34), 345803. <https://doi.org/10.1088/1361-648X/ab20a3>
- Lakshminarayanan, N., Kuhn, J. N., Rykov, S. A., Millet, J. M., & Ozkan, U. S. (2010). Doped LaFeO₃ as SOFC catalysts: Control of oxygen mobility and oxidation activity. *Catalysis Today*, 157(1–4), 446–450. <https://doi.org/10.1016/j.cattod.2010.03.037>
- Lebid, M., & Omari, M. (2014). Synthesis and electrochemical properties of LaFeO₃ oxides prepared via sol–gel method. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 39(1), 147–152. <https://doi.org/10.1007/s13369-013-0883-8>
- Li, F., Wang, Z., Wang, A., Wu, S., & Zhang, L. (2020). N-type LaFe_{1-x}Mn_xO₃ prepared by sol-gel method for gas sensing. *Journal of Alloys and Compounds*, 816, 152647. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.152647>
- Liu, X., Ji, H., Gu, Y., & Xu, M. (2006). Preparation and acetone sensitive characteristics of nano-LaFeO₃ semiconductor thin films by polymerization complex method. *Materials Science and Engineering B*, 133(1–3), 98–101. <https://doi.org/10.1016/j.mseb.2006.06.027>
- Lugo, L. I. O., Miró, A. M. B., Luévanos, A. M., Escobedo, C. A. C., Cardona, M. R., & Jesús, F. S. (2021). Multiferroicidad en LaFeO₃ sintetizada mediante molienda de alta energía. *Tópicos de Investigación en Ciencias de la Tierra y Materiales*, 8(8), 20–24. <https://doi.org/10.29057/aactm.v8i8.7586>
- Mawdsley, J. R., & Krause, T. R. (2007). Rare earth-first-row transition metal perovskites as catalysts for the autothermal reforming of hydrocarbon fuels to generate hydrogen. *Applied Catalysis A: General*, 334(1–2), 311–320. <https://doi.org/10.1016/j.apcata.2007.10.018>
- Moghadam, L. N., & Ranjbar, Z. R. (2019). Cost-efficient solar cells using nanocrystalline perovskite La (Fe and Mn) O₃ and candle soot: Theory and experiment. *Journal of Alloys and Compounds*, 785, 117–124. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.01.068>



- Morales, L., Sierra-Gallego, G., Barrero, C., & Arnache, O. (2016). Relative recoilless F-factors in REFeO_3 (RE = rare-earth La, Pr, Nd and Sm) orthoferrites synthesized by self-combustion method. *Materials Science and Engineering B*, 211, 94–100. <https://doi.org/10.1016/j.mseb.2016.06.005>
- Naibaho, M., Widakdo, J., Kurniawan, B., Nehan, P. Z. Z., Vitayaya, O., Novita, Ramlan, Adi, W. A., & Ginting, M. (2024). Analysis of structure, morphology, magnetic properties, and microwave absorption of lanthanum orthoferrite (LaFeO_3). *Science & Technology Indonesia*, 9(4), 851–856. <https://doi.org/10.26554/sti.2024.9.4.851-856>
- Ozkan, D. Ç., Turk, A., & Çelik, E. (2020). Synthesis and characterizations of sol–gel derived LaFeO_3 perovskite powders. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 31(24), 22789–22809. <https://doi.org/10.1007/s10854-020-04803-8>
- Ozdemir, O., Dunlop, D. J., & Berquó, T. S. (2008). Morin transition in hematite: Size dependence and thermal hysteresis. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 9(10). <https://doi.org/10.1029/2008gc002110>
- Pasieczna-Patkowska, S., Cichy, M., & Flieger, J. (2025). Application of Fourier transform infrared (FTIR) spectroscopy in characterization of green synthesized nanoparticles. *Molecules*, 30(3), 684. <https://doi.org/10.3390/molecules30030684>
- Pérez, H. A., López, C. A., Furlong, O. J., Nazzarro, M. S., Marchetti, S. G., Cadús, L. E., & Agüero, F. N. (2022). Highly resistant $\text{LaCo}_{1-x}\text{Fe}_x\text{O}_3$ perovskites used in chlorobenzene catalytic combustion. *Catalysts*, 13(1), 42. <https://doi.org/10.3390/catal13010042>
- Pirtarighat, S., Ghannadnia, M., & Baghshahi, S. (2018). Green synthesis of silver nanoparticles using the plant extract of *Salvia spinosa* grown in vitro and their antibacterial activity assessment. *Journal of Nanostructure in Chemistry*, 9(1), 1–9. <https://doi.org/10.1007/s40097-018-0291-4>
- Popa, M., & Moreno, J. M. C. (2010). Lanthanum ferrite ferromagnetic nanocrystallites by a polymeric precursor route. *Journal of Alloys and Compounds*, 509(10), 4108–4116. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2010.12.162>
- Prasad, P., Sivanandan, V. T., & Prasad, A. S. (2024). Room temperature ferromagnetic behavior of nanocrystalline LaFeO_3 perovskite oxide synthesized through phytochemical mediated combustion technique. *Journal of Cluster Science*, 35(3), 929–940. <https://doi.org/10.1007/s10876-023-02516-6>



- Radzikowska-Büchner, E., Flieger, W., Pasieczna-Patkowska, S., Franus, W., Panek, R., Korona-Głowniak, I., Suśniak, K., Rajtar, B., Świątek, Ł., Żuk, N., Bogucka-Kocka, A., Makuch-Kocka, A., Maciejewski, R., & Flieger, J. (2023). Antimicrobial and apoptotic efficacy of plant-mediated silver nanoparticles. *Molecules*, 28(14), 5519. <https://doi.org/10.3390/molecules28145519>
- Scrimshire, A., Lobera, A., Bell, A. M. T., Jones, A. H., Sterianou, I., Forder, S. D., & Bingham, P. A. (2018). Determination of Debye temperatures and Lamb–Mössbauer factors for LnFeO₃ orthoferrite perovskites (Ln = La, Nd, Sm, Eu, Gd). *Journal of Physics: Condensed Matter*, 30(10), 105704. <https://doi.org/10.1088/1361-648X/aaab7d>
- Saha, J., Jana, Y., Mukherjee, G., Mondal, R., Kumar, S., & Gupta, H. (2020). Structure, Mössbauer spectroscopy and vibration phonon spectra in valence-bond force-field model approach for distorted perovskites AFeO₃ (A = La, Y). *Materials Chemistry and Physics*, 240, 122286. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2019.122286>
- Salzer, R., & Siesler, H. W. (Eds.). (2009). *Infrared and Raman spectroscopic imaging*. Wiley-VCH.
- Sorescu, M., Tianghon, X., & Hannan, A. (2011). Initial stage growth mechanism of LaFeO₃ perovskite through magnetomechanical ball-milling of lanthanum and iron oxides. *American Journal of Material Science*, 1(1), 57–66. <http://article.sapub.org/pdf/10.5923/j.materials.20110101.09.pdf>
- Sorescu, M., Xu, T., Burnett, J. D., & Aitken, J. A. (2011). Investigation of LaFeO₃ perovskite growth mechanism through mechanical ball milling of lanthanum and iron oxides. *Journal of Materials Science*, 46(20), 6709–6717. <https://doi.org/10.1007/s10853-011-5625-2>
- Suryanarayana, C. (2001). Mechanical alloying and milling. *Progress in Materials Science*, 46(1–2), 1–184. [https://doi.org/10.1016/S0079-6425\(99\)00010-9](https://doi.org/10.1016/S0079-6425(99)00010-9)
- Thuy, N. T., & Minh, D. L. (2012). Size effect on the structural and magnetic properties of nanosized perovskite LaFeO₃ prepared by different methods. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2012, 1–6. <https://doi.org/10.1155/2012/380306>
- Vijayaraghavan, T., Sivasubramanian, R., Hussain, S., & Ashok, A. (2017). A facile synthesis of LaFeO₃-based perovskites and their application towards sensing of neurotransmitters. *ChemistrySelect*, 2(20), 5570–5577. <https://doi.org/10.1002/slct.201700723>



- Wang, B., Yu, Q., Zhang, S., Wang, T., Sun, P., Chuai, X., & Lu, G. (2017). Gas sensing with yolk-shell LaFeO₃ microspheres prepared by facile hydrothermal synthesis. *Sensors And Actuators B Chemical*, 258, 1215-1222. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2017.12.018>
- Zboril, R., Mashlan, M., & Petridis, D. (2002). Iron(III) oxides from thermal processes: Synthesis, structural and magnetic properties, Mössbauer spectroscopy characterization, and applications. *Chemistry of Materials*, 14(3), 969–982. <https://doi.org/10.1021/cm0111074>





Determinación de esfuerzos tectónicos a partir de los mecanismos focales de terremotos en la microplaca de Panamá, República de Panamá

Determination of tectonic stresses from the focal mechanisms of earthquakes in the Panama microplate, Republic of Panama

Elizabeth Muñoz

Universidad de Panamá, Facultad de Ciencias Naturales, Exactas y Tecnología, Panamá

facinet25@gmail.com

<https://orcid.org/0009-0009-9230-2324>

Néstor Luque

Universidad de Panamá, Facultad de Ciencias Naturales, Exactas y Tecnología, Departamento de Física, Panamá. nestor.luque@up.ac.pa

<https://orcid.org/0000-0003-4564-1947>

Julissa Sanjur

Universidad de Panamá, Facultad de Ingeniería, Departamento de Ciencias de la Tierra, Panamá. julissa.sanjur@up.ac.pa

<https://orcid.org/0009-0000-1845-9651>

Allan López

Universidad Latina, Ingeniería Civil, Costa Rica.

allan.lopez@geologos.or.cr

<https://orcid.org/0000-0002-3845-3027>

Arkin Tapia

Universidad de Panamá, Facultad de Ingeniería, Departamento de Ciencias de la Tierra, Panamá.

arkin.tapiae@up.ac.pa

<https://orcid.org/0000-0003-2355-4615>

Autor de correspondencia: facinet25@gmail.com

Fecha de recepción: 17 de marzo 2026

Fecha de aceptación: 13 de mayo de 2026

DOI: <https://doi.org/10.48204/j.tecno.v8n2.a10882>



RESUMEN

En este trabajo se caracterizó el campo de esfuerzos tectónicos de la microplaca de Panamá mediante el análisis de la sismicidad ocurrida entre los años 2015 y 2019. Para ello, se utilizaron eventos sísmicos con magnitudes iguales o superiores a Mw 4.0, registrados por el Instituto de Geociencias de la Universidad de Panamá, lo que permitió disponer de una base de datos robusta de 965 sismos. A partir de estos registros, se determinaron 275 mecanismos focales confiables mediante el análisis de las polaridades de la onda P, garantizando la calidad de la información empleada.

Con los mecanismos focales obtenidos, se calcularon los tensores de esfuerzo en nueve de las diez regiones sismogénicas definidas en el estudio, utilizando el programa Win Tensor. Este análisis permitió estimar parámetros fundamentales como la orientación de los ejes principales de esfuerzo (σ_1 , σ_2 y σ_3), los coeficientes R y R', los tipos de régimen tectónico y la dirección del esfuerzo máximo horizontal (SHmax). Los resultados fueron representados mediante mapas elaborados con el software Generic Mapping Tool (GMT) y visualizados en la plataforma CASMO del Mapa Mundial de Esfuerzos.

Los mapas obtenidos revelan una notable heterogeneidad espacial en los regímenes de esfuerzo dentro de la microplaca de Panamá. Se identificaron zonas dominadas por esfuerzos compresivos, extensivos, de rumbo y regímenes mixtos. Regiones como Punta Burica muestran coexistencia de regímenes compresivos y extensivos, mientras que en Panamá Este predominan regímenes extensivos y compresivos con componente de rumbo. En la región de Talamanca, en la frontera Panamá–Costa Rica, también se evidencian regímenes tectónicos complejos.

En conjunto, este estudio aporta una visión integral de la dinámica tectónica de la microplaca de Panamá, destacando su complejidad estructural y contribuyendo al entendimiento regional de los procesos sísmicos y tectónicos activos.

PALABRAS CLAVE

Microplaca de Panamá, esfuerzos tectónicos, mecanismos focales, regímenes tectónicos y sismicidad

ABSTRACT

This study aimed to characterize the tectonic stress field of the Panama microplate through the analysis of seismicity that occurred between 2015 and 2019. For this purpose, seismic events with magnitudes equal to or greater than Mw 4.0, recorded by the Institute of Geosciences, were used, resulting in a robust database of 965 earthquakes. From these records, 275 reliable focal mechanisms were determined through the analysis of P-wave polarities, ensuring the quality of the data used.

Based on the obtained focal mechanisms, stress tensors were calculated for nine of the ten seismogenic regions defined in the study using the Win Tensor software. This analysis allowed the estimation of key parameters such as the orientation of the principal stress axes (σ_1 , σ_2 , and σ_3), the R and R' coefficients, the tectonic regime types, and the orientation of the maximum horizontal stress (SHmax). The results were represented in maps generated using GMT software and visualized on the CASMO platform of the World Stress Map.

The resulting maps reveal a marked spatial heterogeneity of stress regimes within the Panama microplate. Areas dominated by compressional, extensional, strike-slip, and mixed stress regimes were identified. Regions such as Punta Burica exhibit the coexistence of compressional and extensional regimes, whereas in eastern Panama,



extensional and compressional regimes with a strike-slip component predominate. In the Talamanca region, along the Panama–Costa Rica border, complex tectonic regimes were also identified.

Overall, this study provides a comprehensive view of the tectonic dynamics of the Panama microplate, highlighting its structural complexity and contributing to the regional understanding of active seismic and tectonic processes.

KEYWORDS

Panama microplate, tectonic stresses, focal mechanisms, tectonic regimes, and seismicity

INTRODUCCIÓN

La microplaca de Panamá constituye un elemento fundamental dentro del marco geodinámico de América Central, donde la interacción entre las placas Caribe, Nazca, Cocos y Sudamericana genera patrones complejos de deformación y una sismicidad activa. Este entorno tectónico da lugar a un campo de esfuerzos heterogéneo y a una diversidad de regímenes tectónicos, lo que convierte al istmo de Panamá en una región clave para el estudio de la deformación intraplaca y las interacciones entre límites de placas. La caracterización detallada del campo de esfuerzos tectónicos es esencial para interpretar la dinámica regional, evaluar la peligrosidad sísmica y mejorar los modelos tectónicos existentes.

El campo de esfuerzos tectónicos puede inferirse de manera eficaz a partir del análisis de mecanismos focales de terremotos, ya que estos proporcionan información sobre los estilos de fallamiento y la orientación de los ejes principales de esfuerzo (σ_1 , σ_2 y σ_3). La interpretación conjunta de estas soluciones focales permite caracterizar la dinámica interna de la corteza y comprender los procesos geodinámicos que controlan la sismicidad en una región determinada.

Diversos estudios han demostrado la solidez de esta metodología. Por ejemplo, *Zoback (1992)* integró datos de mecanismos focales y otros indicadores para definir el campo de esfuerzos tectónicos a escala global, evidenciando patrones coherentes con los límites de placas. Asimismo, *Álvarez-Gómez et al., (2018)* desarrollaron el proyecto del World Stress Map, consolidando una base de datos global que combina mecanismos focales e inversiones de esfuerzos para identificar regímenes tectónicos dominantes. De igual manera, *Ishibe et al., (2009)* han aplicado técnicas de inversión de esfuerzos en zonas sísmicamente activas de Japón, demostrando la variabilidad espacial de los regímenes compresivos y extensivos tras grandes terremotos.

En conjunto, estos trabajos evidencian que el análisis sistemático de mecanismos focales, combinado con técnicas de inversión de esfuerzos, constituye una herramienta robusta para identificar los regímenes tectónicos dominantes —compresivos, extensivos, transcurrentes o mixtos— y evaluar su distribución espacial en regiones tectónicamente activas.



A escala global, el proyecto World Stress Map (WSM) representa uno de los esfuerzos más completos para compilar y analizar información de esfuerzos a partir de mecanismos focales, datos de pozos y evidencias geológicas (Heidbach *et al.*, 2016). El WSM ha demostrado que la inversión de mecanismos focales es una metodología robusta para identificar patrones de esfuerzo tanto a escala regional como mundial y para contextualizar estudios locales dentro de un marco geodinámico global.

A nivel regional, metodologías similares han sido aplicadas con éxito en áreas tectónicamente complejas comparables a la microplaca de Panamá. En América Central, particularmente en Costa Rica y el sur del istmo, diversos estudios han empleado mecanismos focales e inversión de tensores de esfuerzo para caracterizar la variación espacial de los regímenes tectónicos asociados a la subducción y a la deformación de microplacas. Por ejemplo, Pérez *et al.* (2018) utilizaron mecanismos focales y técnicas de inversión de esfuerzos para identificar transiciones entre regímenes compresivos, extensivos y de rumbo relacionadas con la interacción entre las placas de Cocos y Caribe. Estos trabajos resaltan la eficacia de esta metodología en regiones donde coexisten múltiples procesos tectónicos y donde el campo de esfuerzos presenta una marcada heterogeneidad lateral.

A pesar de la relevancia tectónica de la microplaca de Panamá, los estudios integrales que abordan la distribución espacial del campo de esfuerzos a escala de toda la microplaca siguen siendo limitados. Investigaciones previas se han centrado principalmente en zonas específicas o en estructuras tectónicas particulares, dejando vacíos en la comprensión de los patrones regionales de esfuerzo. La compleja interacción entre la subducción de la placa de Nazca, la influencia de la placa Caribe y la deformación interna del istmo sugiere que el campo de esfuerzos no es uniforme ni simple, lo que requiere análisis actualizados basados en datos sísmicos recientes.

Los avances en las técnicas de inversión de esfuerzos y en las herramientas computacionales han mejorado significativamente la confiabilidad de las estimaciones del campo de esfuerzos. Programas como Win Tensor permiten calcular tensores de esfuerzo a partir de conjuntos de mecanismos focales, proporcionando parámetros clave como la orientación de los ejes principales (σ_1 , σ_2 y σ_3), los coeficientes R y R', la clasificación de los regímenes tectónicos y la orientación del esfuerzo máximo horizontal (SHmax). Asimismo, la representación cartográfica de los resultados mediante herramientas como GMT y su integración en plataformas globales, como CASMO del Mapa Mundial de Esfuerzos (Rajabi *et al.*, 2025), facilitan la comparación entre patrones locales, regionales y globales.

En este contexto, la presente investigación tiene como objetivo caracterizar el campo de esfuerzos tectónicos de la microplaca de Panamá mediante el análisis de la sismicidad registrada entre 2015 y 2019, considerando eventos con magnitudes $M_w \geq 4.0$. A través de



la determinación de mecanismos focales confiables y el cálculo de tensores de esfuerzo en las principales regiones sismogénicas, este estudio aporta nuevos elementos para comprender la complejidad tectónica del Istmo panameño y contribuye al entendimiento regional y global de los procesos tectónicos y sísmicos activos.

Antecedentes

A nivel internacional, diversos estudios han aplicado el análisis de mecanismos focales y la inversión de esfuerzos para caracterizar campos de esfuerzo en zonas sísmicamente activas. Un ejemplo relevante es el estudio realizado en el norte de Japón, donde *Susukida et al. (2021)* determinaron los campos de esfuerzos en la zona de réplicas del terremoto de Hokkaido Oriental Iburi de 2018. A partir de soluciones de mecanismos focales, los autores realizaron una inversión de esfuerzos que permitió identificar el predominio de fallas inversas en la región. Adicionalmente, propusieron que los valores promedio del parámetro R varían en función de la profundidad, lo que evidencia cambios en el régimen tectónico con el aumento del nivel hipocentral y resalta la importancia de considerar la dimensión vertical en los estudios de esfuerzos tectónicos.

A escala regional, múltiples investigaciones en América han empleado metodologías similares para comprender la dinámica tectónica asociada a zonas de subducción y deformación cortical. En Centroamérica, *López (2018)* analizó la sismicidad del norte y sur de Honduras considerando eventos con magnitud $M_w > 4.0$, a partir de los cuales calculó tensores de esfuerzo mediante mecanismos focales. Sus resultados indicaron un régimen predominantemente compresivo con fallas inversas asociadas a la subducción, principalmente hasta profundidades de 25 km, y se recomendó ampliar estos análisis a mayores profundidades. De manera complementaria, en Norteamérica, *Domínguez et al. (2019)* estudiaron grandes terremotos en la región de México mediante inversión del tensor sísmico y análisis de mecanismos focales, obteniendo resultados característicos de un entorno de subducción. En Sudamérica, *Morandi et al. (2001)* identificaron regímenes transtensionales y compresivos en el norte de Venezuela mediante el método de los diedros rectos, mientras que *Vásquez (2019)* determinó el tensor de esfuerzos en el nido sísmico de Bucaramanga, Colombia, utilizando ISOLA y Stress Inverse, evidenciando una compleja orientación de los esfuerzos principales.

A nivel local, investigaciones recientes han demostrado que la microplaca de Panamá presenta una sismicidad variada asociada a una compleja interacción tectónica. *González (2020)* analizó patrones de sismicidad y mecanismos focales, concluyendo que los

terremotos en la región responden a la interacción entre placas y a la deformación interna de la microplaca. Asimismo, estudios enfocados en la amenaza sísmica han analizado mecanismos focales en sectores específicos, como el extremo norte de la Zona de Fractura de Panamá (*Camacho, 2003*). Otras investigaciones se han concentrado en el sur de Panamá,



particularmente en el sistema de fallas Azuero–Soná, donde el análisis de mecanismos focales compuestos evidenció la presencia de mecanismos con componentes inversas y normales (*Sanjur et al., 2025*). En conjunto, estos antecedentes destacan la necesidad de estudios integrales que permitan una caracterización sistemática del campo de esfuerzos tectónicos en toda la microplaca de Panamá.

Contexto geodinámico

El istmo de Panamá representa un escenario tectónico singular debido a su ubicación en una zona de interacción múltiple entre placas y bloques tectónicos. En este contexto, la microplaca de Panamá presenta características propias de los tres tipos de límites tectónicos, lo que la convierte en una región de elevada complejidad geodinámica, intensa deformación y notable actividad sísmica. Esta configuración favorece la coexistencia de diversos estilos de fallamiento y mecanismos focales, así como una distribución heterogénea del campo de esfuerzos.

La microplaca de Panamá es un bloque tectónico relativamente rígido que se ha desarrollado como resultado de la interacción prolongada entre la placa del Caribe y la placa de Nazca. Su evolución tectónica está estrechamente vinculada a procesos de subducción, colisión, acreción y deformación cortical que han operado desde el Cretácico hasta el Cuaternario reciente. La subducción de la placa de Nazca bajo el margen sur del istmo genera un régimen compresivo dominante, responsable de la acumulación de tensiones en la corteza y su posterior liberación en forma de terremotos (*Bilek, 2017*).

Además de la influencia directa de la subducción, la microplaca de Panamá se encuentra sometida a la interacción con placas vecinas, principalmente la placa del Caribe, la placa de Cocos y la placa Sudamericana. Este entorno tectónico complejo da lugar a un sistema de esfuerzos tridimensional que se distribuye de manera heterogénea en la corteza terrestre, favoreciendo la formación de fallas activas, zonas de cizalla y estructuras compresivas y extensivas.

Estudios geodésicos basados en mediciones GPS han evidenciado que la microplaca de Panamá presenta un desplazamiento promedio del orden de 3 cm/año, lo que confirma la existencia de una actividad tectónica significativa y persistente (*González, 2020*). Este movimiento relativo contribuye a la reactivación de estructuras preexistentes y al desarrollo de nuevos sistemas de fallas, aspectos fundamentales para la interpretación de la sismicidad regional.

Importancia del análisis de mecanismos focales

El análisis de mecanismos focales permite reconstruir el campo de esfuerzos tectónicos y comprender la dinámica de deformación cortical en una región determinada. A partir de la inversión de datos sísmicos y del estudio de la radiación de ondas, es posible inferir las



orientaciones de los ejes principales de esfuerzo y evaluar la relación entre sismicidad y estructuras geológicas activas. En regiones tectónicamente complejas como la microplaca de Panamá, este análisis resulta esencial para identificar patrones de deformación y zonas de mayor peligro sísmico (González, 2020).

Asimismo, el estudio sistemático de mecanismos focales contribuye a la evaluación del riesgo sísmico, ya que permite reconocer áreas donde predominan ciertos estilos de fallamiento y estimar la probabilidad de ocurrencia de eventos sísmicos significativos.

Esfuerzo tectónico y estados de esfuerzo

El esfuerzo, en términos de geología estructural, se define como la fuerza aplicada sobre un área determinada y se utiliza para describir aquellas fuerzas que modifican la orientación, tamaño y posición de una masa rocosa (Tarbuck & Lutgens, 2011). El esfuerzo tectónico corresponde específicamente a las fuerzas generadas en la corteza terrestre como consecuencia del movimiento relativo de las placas tectónicas (Angelier, 1994a).

El estado de esfuerzos describe la magnitud y orientación de los esfuerzos que actúan en un punto específico de la corteza terrestre y se representa matemáticamente mediante un tensor de esfuerzos (Jaeger et al., 2007). La inversión de datos estructurales y sísmicos permite determinar las orientaciones de los esfuerzos principales, incluyendo el esfuerzo horizontal máximo y mínimo, así como la forma del elipsoide de esfuerzos. Bott (1959) formuló una relación fundamental entre la orientación del plano de falla y la forma del elipsoide de esfuerzos, proporcionando una base teórica para la interpretación de mecanismos de falla oblicuos.

El índice de relación entre los esfuerzos principales se expresa mediante la ecuación:

$$R' = \frac{(\sigma_z - \sigma_x)}{(\sigma_y - \sigma_x)}$$

donde σ_x , σ_y y σ_z representan los esfuerzos principales.

Tensor de esfuerzos y tipos de esfuerzo

El tensor de esfuerzos es una herramienta clave para comprender el comportamiento mecánico de las rocas y la deformación tectónica. Sus componentes incluyen esfuerzos normales, que actúan perpendicularmente a una superficie y pueden generar compresión o extensión, y esfuerzos cortantes, que actúan paralelamente y son responsables del deslizamiento a lo largo de fallas (Jaeger et al., 2007; Pollard & Aydin, 1988).

Dependiendo del número de direcciones en las que actúan las fuerzas, los estados de esfuerzo pueden clasificarse en uniaxiales, biaxiales y triaxiales. El esfuerzo triaxial es



particularmente relevante en estudios sismotectónicos, ya que simula condiciones reales del subsuelo y permite evaluar el comportamiento de materiales bajo cargas dinámicas, como las inducidas por terremotos (*Jaeger & Cook, 1979*).

En esta investigación se empleó el programa Win Tensor, el cual permite la inversión de datos de fallas y mecanismos focales para determinar el tensor de esfuerzos reducido. Los parámetros obtenidos se interpretaron siguiendo criterios ampliamente aceptados y utilizados en el proyecto del Mapa Mundial de Esfuerzos (WSM), incluyendo los esquemas de calidad propuestos por *Zoback (1992)* y los desarrollos metodológicos de *Delvaux y colaboradores (Delvaux et al., 1997; Delvaux & Sperner, 2003a)*.

Marco sismotectónico de Panamá

La República de Panamá se localiza sobre la microplaca de Panamá, la cual actúa como un bloque relativamente rígido dentro de un entorno de convergencia múltiple (*Kellogg et al., 1985*). Esta posición geológica singular explica la elevada deformación y actividad sísmica del país. La interacción entre la placa del Caribe, la microplaca de Panamá y la subducción de la placa de Nazca genera un complejo sistema de tensiones que se manifiesta en terremotos de diversa magnitud y mecanismos focales variados (*Bilek, 2017*).

Desde el punto de vista geológico, el bloque de Panamá registra múltiples fases tectónicas, incluyendo procesos de acreción oceánica, magmatismo, vulcanismo, erosión y sedimentación, reflejados en la diversidad litológica observada desde el Cretácico hasta el Cuaternario reciente (*Canal de Panamá, 2020*).

Las distintas zonas sismogénicas del territorio panameño, como Chiriquí, Azuero, la Zona de Sutura de Panamá y el Cinturón Deformado del Norte de Panamá presentan estilos tectónicos y mecanismos focales específicos, controlados por la interacción de fallas regionales y la dinámica de las placas adyacentes (*Barritt & Berrangé, 1987; Hardy et al., 1990; Camacho, 1991; Corrigan et al., 1990*).

MATERIALES Y METODOS

La metodología empleada en esta investigación se fundamenta en el análisis de mecanismos focales de terremotos como herramienta principal para la determinación de los tensores de esfuerzos tectónicos y la caracterización del régimen de deformación sismotectónica actual



en la Microplaca de Panamá. Este enfoque ha sido ampliamente utilizado en estudios geodinámicos debido a su capacidad para inferir el estado de esfuerzos en la corteza a partir de la orientación y cinemática de las fallas activadas durante los eventos sísmicos (*Angelier, 1979b; Michael, 1984; Gephart & Forsyth, 1984*). La inversión de esfuerzos se realizó mediante el software Win Tensor versión 5.9.3 (*Delvaux & Sperner, 2003a*), el cual permite obtener soluciones robustas del tensor de esfuerzos a partir de datos sísmicos depurados.

El área de estudio corresponde a la República de Panamá, específicamente a la Microplaca de Panamá, una unidad tectónica cuya evolución está controlada principalmente por la interacción entre las placas del Caribe y Nazca. Esta interacción ha generado una compleja configuración estructural y litológica, evidenciada por la presencia de diversos tipos de rocas formadas desde el Cretácico hasta la actualidad, así como por una actividad sísmica significativa asociada a distintos regímenes tectónicos.

Los datos sísmicos utilizados en esta investigación fueron suministrados por el Instituto de Geociencias de la Universidad de Panamá (IGC-UP) y complementados con información del catálogo del Global CMT Project (*Dziewonski et al., 1981*). Se seleccionaron eventos sísmicos con magnitud momento $M_w \geq 4,0$ ocurridos entre los años 2015 y 2019, abarcando un periodo de cinco años. Este proceso permitió conformar una población inicial de 965 eventos sísmicos, distribuidos anualmente como se muestra en la Tabla 1. Todos los eventos fueron revisados exhaustivamente con el objetivo de garantizar la calidad y confiabilidad de los datos utilizados para la determinación de los mecanismos focales.

Como parte del proceso metodológico, se establecieron una serie de actividades secuenciales. En primer lugar, se realizó la selección de los eventos sísmicos a partir de los registros almacenados en formato SEISAN (*Ottewöller, Voss & Havskov, 2024*). Además del criterio de magnitud, se consideró únicamente aquellos eventos registrados por más de 12 estaciones sísmicas, lo cual permitió asegurar una adecuada cobertura azimutal y mejorar la resolución de las soluciones obtenidas.

Posteriormente, se procedió a la determinación de las zonas sismogénicas con el objetivo de agrupar los mecanismos focales según su contexto tectónico y profundidad. Para ello, se tomó como referencia la zonificación sísmica nacional propuesta por *Benito et al. (2012)*, la cual clasifica los sismos en función de su profundidad y régimen tectónico. Considerando que la discontinuidad de Mohorovičić en Panamá se localiza aproximadamente a 25 km de profundidad, el estudio se enfocó en la sismicidad cortical (<25 km).

Tabla 1
Compendio de eventos sísmicos desde el 2015-2019

Año	Eventos
-----	---------



2019	167
2018	175
2017	170
2016	151
2015	302
Total:	965

Nota Tabla 1: En la tabla se muestra la sismicidad por cada año desde el 2015 hasta el año 2019.

A partir de esta clasificación, se definieron diez zonas sismogénicas dentro de la Microplaca de Panamá, las cuales incluyen regiones como la Zona de Fractura de Panamá, el Cinturón Deformado del Sur y del Norte de Panamá, así como sectores específicos dentro de este último (ver Tabla 2).

Tabla 2

Zonas sismogénicas en la Microplaca Panamá.

Nombre de la zona	Nomenclatura
Punta Burica	C4
Zona de Fractura de Panamá (ZFP)	P1
Cinturón Deformado del Sur de Panamá (CDSP)	P2
Panamá Oeste	P5
Panamá Central	P6
Panamá Este	P7
Cinturón Deformado del Norte de Panamá (CDNP)	P8, P9 P10
Costa Rica, Talamanca	C7

Nota Tabla 2: Se presenta la nomenclatura que se utilizó para las regiones sismogénicas. Fuente: *Benito et al., (2012)*.



La delimitación espacial de estas zonas se realizó mediante la creación de archivos de texto que contienen las coordenadas de los polígonos representativos de cada región, utilizando el editor Notepad++ (Ho, 2026). Estos archivos fueron posteriormente integrados en scripts ejecutados con el software Generic Map Tools (GMT) (Wessel *et al.*, 2013), lo que permitió la elaboración de mapas de las regiones sismogénicas.

La determinación de los mecanismos focales se llevó a cabo utilizando el programa SEISAN (Ottmøller, Voss & Havskov, 2024), específicamente a través de la rutina FOCMEC (Snoke *et al.*, 1984). En esta etapa se revisó cuidadosamente la polaridad de las ondas P, verificando si correspondían a compresión o dilatación, así como la calidad de las estaciones utilizadas y la distribución espacial de las mismas. Asimismo, se establecieron criterios estrictos de calidad basados en los residuos de localización, tales como $RMS < 1.0$, errores de latitud y longitud menores a 10 km, y error de profundidad inferior a 20 km, siguiendo los lineamientos propuestos por Shearer (2019).

Una vez obtenidas las soluciones de los mecanismos focales, se realizó un análisis comparativo con el marco geológico regional, y se aplicaron filtros adicionales que permitieron depurar el conjunto de datos. Como resultado, se seleccionaron 275 eventos sísmicos considerados confiables para el análisis de esfuerzos, cuyo resumen anual se presenta en la Tabla 3. Estos eventos fueron clasificados según las zonas sismogénicas definidas previamente, obteniéndose la distribución mostrada en la Tabla 4.

Tabla 3

Número de eventos sísmicos por año, utilizados para los mecanismos focales.

año	2015	2016	2017	2018	2019	Total
eventos	81	55	39	43	57	275

Nota Tabla 3: En la tabla se muestra la cantidad de sismos depurados por año, de acuerdo con los parámetros establecidos.

Tabla 4

Distribución de eventos sísmicos por regiones



Nombre de la zona	Nomenclatura	Eventos sísmicos
Punta Burica	C4	87
Zona de Fractura de Panamá (ZFP)	P1	11
Cinturón Deformado del Sur de Panamá (CDSP)	P2	69
Panamá Oeste	P5	14
Panamá Central	P6	5
Panamá Este	P7	24
Cinturón Deformado del Norte de Panamá (CDNP)	P8	28
	P9	3
	P10	10
Costa Rica, Talamanca	C7	22
No pertenece a ninguna zona	Sin nomenclatura	2

Nota Tabla 4: En la tabla se muestra la distribución de eventos sísmicos en cada una de las zonas sismogénicas.

Con las soluciones finales de mecanismos focales, se procedió a la elaboración de mapas de mecanismos focales por región sismogénica. Para ello, se integraron los datos en scripts desarrollados en Notepad++ y ejecutados en GMT versión 6, lo que permitió representar gráficamente la distribución espacial y el tipo de mecanismo dominante en cada zona.

El cálculo de los estados de esfuerzos actuales se realizó mediante el software Win Tensor, utilizando el método interactivo de optimización rotacional propuesto por *Delvaux y Sperner (2003a)*. Este método permite una separación progresiva de los mecanismos focales en función del ángulo de fricción y la optimización del tensor de esfuerzos. Los resultados fueron evaluados siguiendo el esquema de calidad del World Stress Map (WSM), donde se consideran confiables los indicadores de calidad A, B y C, de acuerdo con los criterios establecidos por *Heidbach et al., (2016)*.

Finalmente, los valores del esfuerzo horizontal máximo (SHmax) obtenidos para cada región fueron utilizados para la elaboración de mapas de esfuerzos mediante la interfaz CASMO del proyecto World Stress Map (*Heidbach et al., 2025*). Para ello, se ingresaron los parámetros requeridos, tales como ubicación geográfica, orientación del esfuerzo, profundidad, calidad



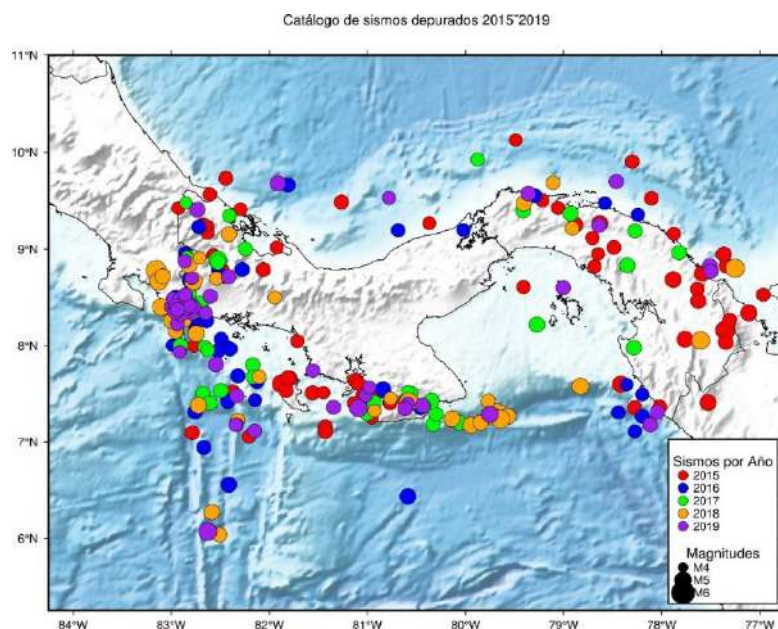
y régimen tectónico, obteniéndose mapas finales en formatos PDF y PNG que sintetizan el estado de esfuerzos actual en la Microplaca de Panamá.

RESULTADOS

Los resultados de esta investigación se presentan a través de las actividades desarrolladas: Mapa de los 275 eventos sísmicos depurados (Figura 1).

Figura 1

Catálogo de sismicidad en la Microplaca de Panamá



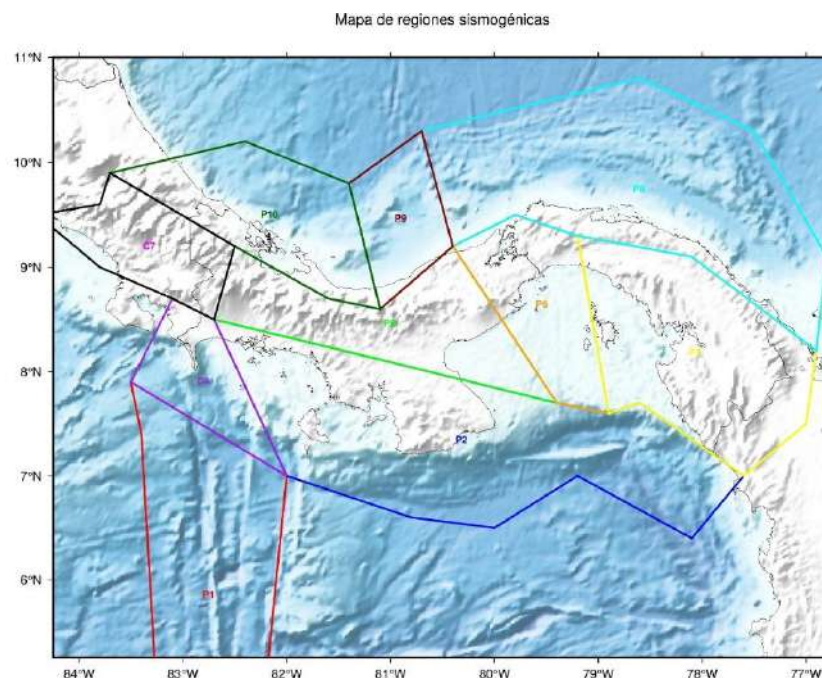
Nota Figura 1: En la figura 1 se muestra la distribución espacial de los eventos sísmicos depurados del año 2015 hasta el 2019. Se han asignado colores para identificarlos por año.

Con apoyo del software GMT (*Wessel et al., 2013*), se elaboró un mapa estructural que permitió delimitar diez (10) regiones sismogénicas dentro de la Microplaca de Panamá (Figura 2).

Figura 2

Mapa de las regiones sismogénicas





Nota

muestra

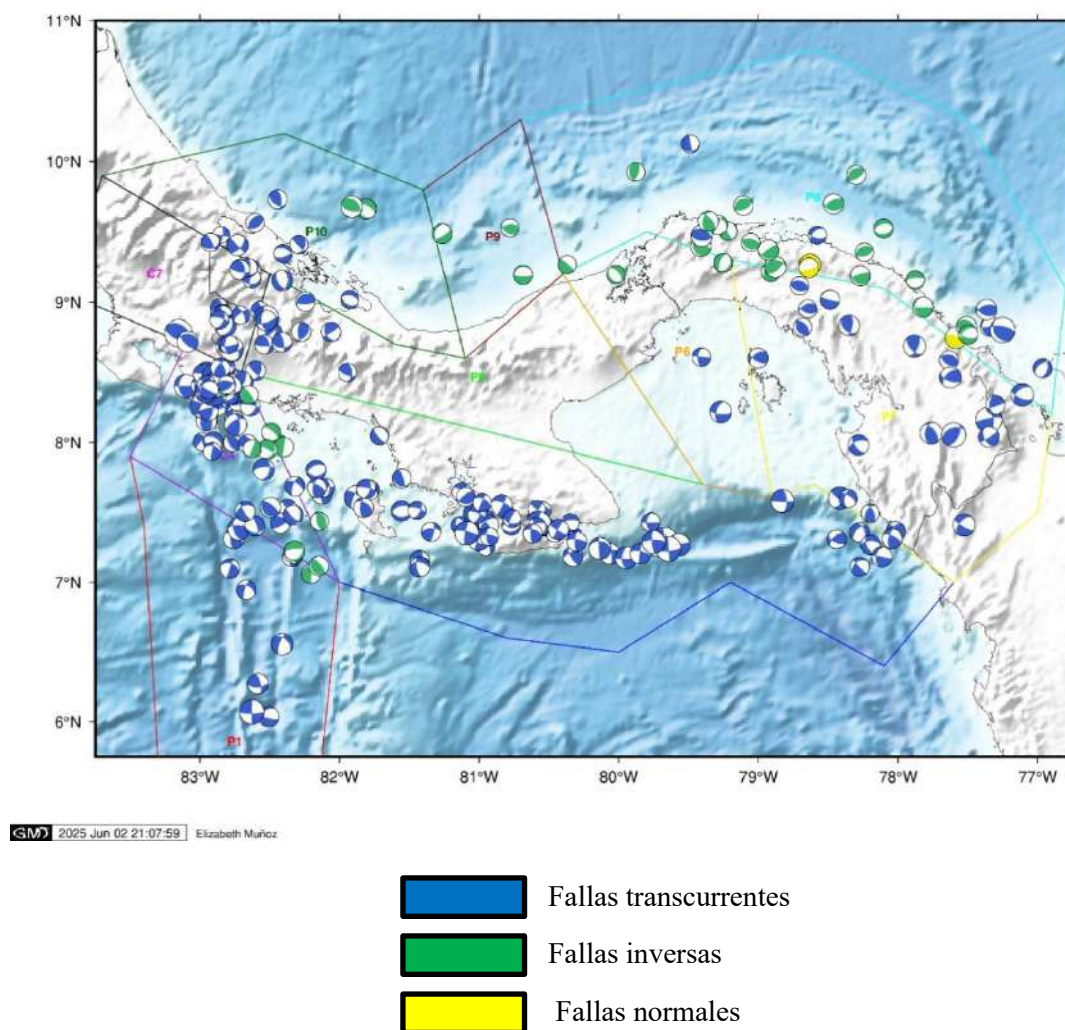
de las zonas sismogénicas con las correspondientes nomenclaturas para cada una. Según la nomenclatura corresponden a: Punta Burica (C4), Zona de Fractura de Panamá (P1), Cinturón Deformado del Sur de Panamá (P2), Panamá Oeste (P5), Panamá Central (P6), Panamá Este (P7), Cinturón Deformado del Norte de Panamá Oriente (P8), Cinturón Deformado del Norte de Panamá Central (P9), Cinturón Deformado del Norte de Panamá Occidente (P10). Fuente: (Molina et al., 2008).

Figura 2: Se la ubicación

A partir del análisis de las polaridades del primer arribo de la onda P y la aplicación de criterios estrictos de control de calidad, se identificaron 275 mecanismos focales confiables, los cuales constituyeron la base para la caracterización tectónica de las distintas zonas sismogénicas. Estos resultados permitieron elaborar un mapa de mecanismos focales, donde se integran los eventos sísmicos procesados con sus respectivos tipos de fallamiento (Figura 3), proporcionando una visión espacial clara de los estilos de deformación predominantes en cada región.

Figura 3

Mapa de Mecanismos focales por región sismogénica



Nota Figura 3: Se muestran los mecanismos focales ubicados por región sismogénica, se presentan a través de proyecciones estereográficas y se han clasificado por colores de acuerdo con el tipo de fallamiento.

Posteriormente, los mecanismos focales seleccionados fueron utilizados para estimar los estados de esfuerzo tectónico actuales mediante inversiones realizadas con el programa Win Tensor. Para cada región analizada se obtuvieron los tensores de esfuerzo, representados mediante proyecciones estereográficas, histogramas de frecuencia y el Triángulo de

Frohlich, lo que permitió identificar el régimen de esfuerzo dominante. Asimismo, se determinaron los parámetros completos del tensor, incluyendo la orientación de los ejes principales de esfuerzo (σ_1 , σ_2 y σ_3), el esfuerzo horizontal máximo (SHmax), la calidad de la inversión, los índices R y R' y sus incertidumbres asociadas. En algunas regiones se reconocieron dos tensores de esfuerzo diferenciados, mientras que en otras solo fue posible definir un único estado de esfuerzo representativo.

A partir de la inversión de los mecanismos focales realizada a través del programa denominado Win Tensor se obtuvieron los principales parámetros de los tensores de esfuerzos de 10 regiones sismogénicas (Tabla 5).

Tabla 5
Principales parámetros de los tensores de esfuerzos

Sub-vol	σ_1	σ_2	σ_3	R	R'	Q _{WSM}	$\frac{n}{nt}$	Régimen
C4-1	17/243	3/334	73/074	0,10	2,17	B	29/174	TF
C4-2	65/223	25/041	01/131	0,31	0,31	A	19/174	NF
P1-1	14/051	15/144	69/279	0,02	0,50	C	7/11	TF
P1-2	53/125	15/014	33/274	0,26	0,26	C	4/11	UF
P2-1	14/234	55/344	31/135	0,21	1,78	B	33/33	SS
P2-2	58/226	28/077	14/339	0,13	0,13	C	19/138	NF
P5-1	14/073	25/337	61/191	0,01	2,01	B	11/28	TF
P6-1	58/025	30/228	10/132	0,76	0,76	C	4/10	NF
P7-1	02/066	44/158	46/333	0,42	2,42	C	7/11	TS
P7-2	45/129	38/270	21/017	0,06	0,06	C	4/4	NS
P8-1	15/006	11/099	72/224	0,36	2,36	B	12/28	TF
P8-2	80/341	02/242	10/151	0,08	0,08	B	8/28	NF
P9	Sin Data.							
P10-1	07/011	19/279	70/120	0,30	2,30	C	6/20	TF
P10-2	49/315	38/158	11/059	0,35	0,35	C	4/20	NS
C7-1	23/212	32/107	49/331	0,17	2,17	B	14/44	TS
C7-2	25/055	63/213	08/321	0,19	1,79	C	5/44	SS

Nota Tabla 5: Se presentan los resultados de la inversión de los mecanismos focales. Primera columna: nomenclatura de las regiones sismogénicas (en algunas regiones se calcularon dos tensores), segunda columna: datos de sigma 1 (σ_1), en la tercera: la información de sigma 2 (σ_2), en la cuarta columna: valores de sigma 3 (σ_3), quinta columna: datos de R o factor de forma del tensor de esfuerzo, en la séptima columna: sexta columna: valores de R' o índice de régimen de esfuerzo, en la octava: calidad del tensor ya sea A, B, C; novena columna: la



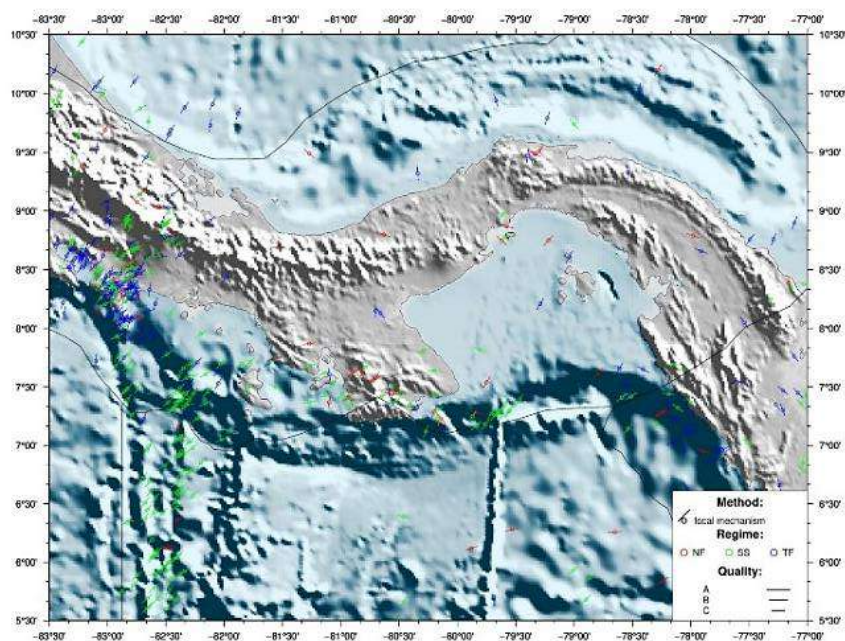
cantidad de mecanismos focales considerados y en la décima columna: se indica el tipo de régimen de esfuerzo: compresivo (TF), transpresivo (TS), rumbo (SS), transtensivo (NS), extensivo (NF) y desconocido (UF).

Mapa de las orientaciones del esfuerzo máximo horizontal.

Se integraron los resultados en el formato HTML del sistema CASMO (Catalog of Stress Magnitudes and Orientations), asociado al proyecto del Mapa Mundial de Esfuerzos. Esta acción permitió generar un mapa adicional que muestra la orientación del esfuerzo máximo horizontal (SHmax) en la Microplaca de Panamá, conforme a estándares internacionales. Se presenta el mapa actual (Figura 4) y el propuesto por la investigación (Figura 5).

Figura 4

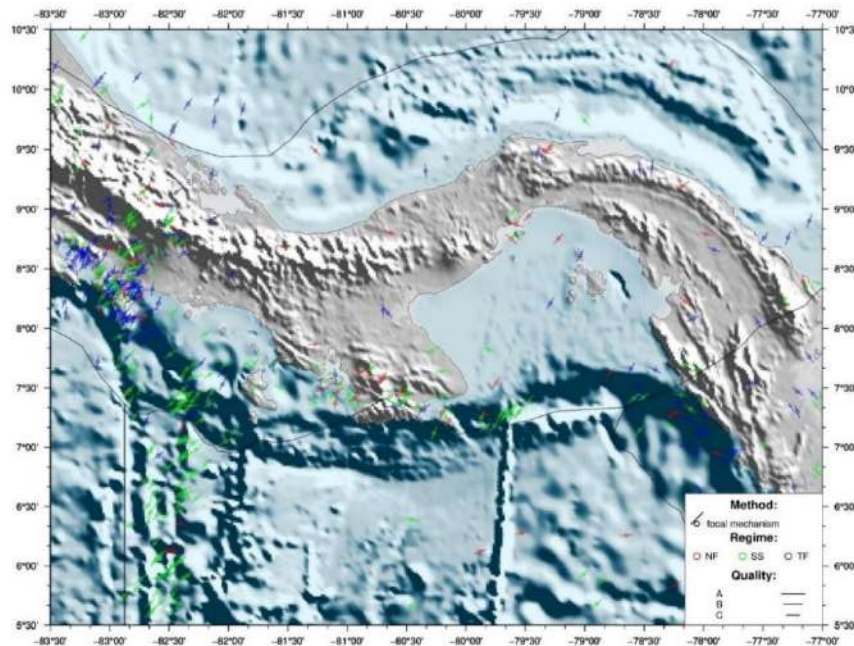
Mapa de esfuerzos actual en la Microplaca Panamá



Nota Figura 4: en este mapa se presentan los regímenes de esfuerzos en la Microplaca Panamá. Esta imagen fue elaborada por CASMO (Heidbach et al., 2025). La leyenda nos indica los regímenes de esfuerzos: color rojo: extensivo (NF), color verde: rumbo (SS) y color azul: compresivo (TF).

Figura 5

Mapa de esfuerzos propuesto de la investigación



Nota Figura 5: en este mapa se presentan los regímenes de esfuerzos determinados en esta investigación (Heidbach *et al.*, 2025). La leyenda nos indica los regímenes de esfuerzos: color rojo: extensivo (NF), color verde: rumbo (SS) y color azul: compresivo (TF).

DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos en este estudio abarcan el análisis de 275 mecanismos focales y el cálculo de tensores de esfuerzos en nueve regiones sismogénicas de la Microplaca de Panamá, estas reflejan la alta complejidad tectónica del istmo y son consistentes con diversos estudios regionales.

- En la región de Punta Burica (C4) se identificaron regímenes tanto compresivos como extensivos, lo cual indica una interacción activa entre la microplaca de Panamá y la placa de Cocos, en un contexto de subducción. Algunos estudios sugieren que tales deformaciones se asocian a un cabalgamiento activo dirigido hacia el suroeste en el Norte de la Península de Burica (Morell, 2016) y a la prolongación de la Zona de Fractura de Panamá hacia tierra firme alineada con el eje central de dicha península (Camacho, 2003).
- En la Zona de Fractura de Panamá (P1), se determinó un régimen predominantemente compresivo, tal como fue determinado en estudios previos por Guender y Protti, (1998), lo que respalda los modelos tectónicos que establecen que en la región de

227



Panamá ha variado de un bloque rígido hasta una zona límite de placas en deformación, asociada a la subducción de la placa de Cocos (*Kobayashi et al., 2014*).

- En el Cinturón Deformado del Sur de Panamá (P2) se identificaron regímenes tectónicos de rumbo y extensivo, consistentes con los resultados del análisis de mecanismos focales efectuado en la zona, el cual se asocia a la actividad de fallas como la Azuero–Soná y otras estructuras paralelas.
- En Panamá Oeste (P5) se evidenció un régimen compresivo hacia la parte occidental de esta, debido a las fallas corticales activas que se ven reflejadas en la suprayacente microplaca de Panamá, inducidas por la subducción de la Dorsal de Cocos (*Quintero et al., 2023*).
- En Panamá Este (P7), se reconocieron regímenes extensivo y compresivo ambos con una componente de rumbo, lo cual es consistente con las investigaciones previas que revelan la evidencia de estos regímenes mediante imágenes satelitales y la presencia de fallas activas en esta región de Darién (*Barat et al., 2012*).
- En el Cinturón Deformado del Norte de Panamá (CDNP), tanto en su sector oriental (P8) como en el occidental (P10), se observa la coexistencia de regímenes de esfuerzos mixtos (compresivos y extensivos con una componente de deslizamiento). Según las investigaciones de *Camacho & Viquez (2011a)*, los mecanismos focales en la región occidental evidencian un predominio de fallamiento inverso, acompañado de episodios de licuefacción. Por su parte, en el extremo oriental del CDNP, se ha identificado la presencia de una zona de Wadati-Benioff, lo que sugiere que la placa Caribe se introduce bajo la costa Caribe de Panamá (*Camacho et al., 2010b*).
- En la región de P9 no se realizó el cálculo de esfuerzos debido al número insuficiente de eventos sísmicos ($n=3$), ya que el programa Win Tensor requiere un mínimo de cuatro eventos para obtener resultados fiables.
- Finalmente en la región de Talamanca (zona fronteriza entre Panamá y Costa Rica^{C7}) se identificaron regímenes compresivos con un componente de deslizamiento lateral y de rumbo. Los esfuerzos tectónicos en esta región son consistente con la distribución de la sismicidad registrada por ChiriNet donde asocian algunos sismos a fallas locales, a una influencia local del sistema volcánico del Barú, así como de posibles fallas no mapeadas (*Vásquez et al., 2021*)

CONCLUSIONES



Con el desarrollo de este trabajo de investigación se han establecido las siguientes conclusiones:

Se obtuvo un sub-catálogo que cuenta con soluciones de mecanismos focales de alta calidad. Esta base de datos nos ha permitido proponer estados de esfuerzos en diferentes zonas de la región que comprende el Istmo de Panamá. Estos estados de esfuerzos propuestos, hasta donde se ha podido determinar, son consistentes con la literatura del estado del arte existente.

El análisis de los regímenes de esfuerzos de las diferentes zonas ha mostrado que la región del Bloque de Panamá refleja un campo de esfuerzo heterogéneo lo que explica la compleja deformación en el Istmo de Panamá.

El mapa de esfuerzos elaborado para la Microplaca de Panamá muestra las orientaciones del esfuerzo horizontal máximo SHmax y los diferentes regímenes tectónicos de cada región sismogénica que evidencia lo heterogéneo de los esfuerzos en todo el bloque tectónico.

Además, los vectores geodésicos reportados por *Kobayashi et al. (2014)*, que indican desplazamientos cercanos a 3 cm/año hacia el noreste de la microplaca de Panamá, presentan una correlación parcial con las orientaciones de SHmax obtenidas en este estudio. En regiones como Punta Burica y el sur de Panamá, dicha relación sugiere un control combinado entre la convergencia oblicua y la deformación interna de la microplaca.

Por otro lado, en la región de Azuero, el SHmax coincide con los sistemas de fallas de rumbo.

Todo el material suplementario extra se puede encontrar en el sitio web https://geociencias.up.ac.pa/sites/geociencias/files/2026-07/material-suplementario-articulo-elizabeth_munoz_et_al.pdf

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Álvarez-Gómez, J. A., Zoback, M. L., Heidbach, O., & Martínez-Garzón, P. (2018). The 2016 update of the World Stress Map database. *Earth-Science Reviews*, 178, 389–398. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2017.12.007>

Angelier, J. (1979b). Determination of the mean principal directions of stresses for a given fault population. *Tectonophysics*, 56(3–4), 17–26. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(79\)90081-7](https://doi.org/10.1016/0040-1951(79)90081-7)

Angelier, J. (1994a). Fault slip analysis and paleostress reconstruction. In P. L. Hancock (Ed.), *Continental deformation* (pp. 53–100). Pergamon Press.



- Barat, F., Mercier de Lépinay, B., Sosson, M., Carla, M., Baumgartner, P., & Baumgartner Mora, C. (2012). Transition from the Farallon Plate subduction to the collision between South and Central America: Geological evolution of the Panama Isthmus. *Tectonophysics*. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2014.03.008>
- Barritt, S. M., & Berrangé, J. P. (1987). *The geology of the Azuero Peninsula, southwest Panamá*. British Geological Survey.
- Benito, B., Lindholm, C., Camacho, E., Climent, Á., Marroquín, G., Molina, E., Talavera, E., Rojas, W., Escobar, J., & Segura, J. (2012). A new evaluation of seismic hazard for the Central America region. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 102(2), 504–523. <https://doi.org/10.1785/0120110015>
- Bilek, S. L. (2017). Tectonic and seismic implications of the Panama microplate. *Geophysical Research Letters*, 44(12), 6096–6104.
- Bott, M. H. (1959). The mechanics of oblique slip faulting. *Geological Magazine*, 96(2), 109–117. <https://doi.org/10.1017/S0016756800059987>
- Camacho, E., (1991). The Puerto Armuelles Earthquake (southwestern Panama) of July 18, 1934. *Rev. Geol. Am. Central* 13, 1–13
- Camacho, E. (2003). Sismotectónica del extremo norte de la Zona de Fractura de Panamá. *Tecnociencia*, 5(2), 139–152.
- Camacho, E., Hutton, W., & Pacheco, J. (2010). Una nueva mirada a la evidencia de una zona Wadati-Benioff y una convergencia activa en el CDNP. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 100(1), 343–348. <https://doi.org/10.1785/0120090204>
- Camacho, Eduardo & Viquez, Vilma. (2011). Historical seismicity of the north Panama deformed belt. *Revista Geológica de América Central*. 15, 49-64 <https://doi.org/10.15517/rgac.v0i15.13238>
- Canal de Panamá. (2020). *Informe de diseño conceptual, reservorios multipropósito. Cuenca Perales–Presa Perales*.
- Corrigan, J., Mann, P., Ingle, J.C., (1990). Forearc response to subduction of the Cocos ridge, Panama-Costa Rica. *Geol. Soc. Am. Bull.* 102 (5), 628–652 [https://doi.org/https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1990\)102%3C0628:FRTSOT%3E2.3.CO;2](https://doi.org/https://doi.org/10.1130/0016-7606(1990)102%3C0628:FRTSOT%3E2.3.CO;2)



- Delvaux, D., & Sperner, B. (2003). New aspects of tectonic stress inversion with reference to the TENSOR program. In D. Nieuwland (Ed.), *New insights into structural interpretation and modelling* (pp. 75–100). Geological Society. <https://doi.org/10.1144/GSL.SP.2003.212.01.06>
- Delvaux, D., Stapel, G., Moeys, R., Petit, C., Levi, K., Miroshnichenko, A., & San'kov, V. (1997). Paleostress reconstructions and geodynamics of the Baikal region, Central Asia, Part 2: Cenozoic rifting. *Tectonophysics*, 282, 1–38. [https://doi.org/10.1016/S0040-1951\(97\)00210-2](https://doi.org/10.1016/S0040-1951(97)00210-2)
- Domínguez, T., Rodríguez Lozoya, H. E., Reyes, G., Quintanar Robles, L., Aguilar Meléndez, A., & Rodríguez Leyva, H. E. (2019). Source parameters, focal mechanisms and stress tensor inversion from moderate earthquakes and its relationship with subduction zone. *Geofísica Internacional*, 58(2), 127–137. <https://doi.org/10.22201/igeof.00167169p.2018.58.2.1965>
- Dziewonski, A. M., Chou, T.-A., & Woodhouse, J. H. (1981). Determination of earthquake source parameters from waveform data for studies of global and regional seismicity. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 86(B4), 2825–2852. <https://doi.org/10.1029/JB086iB04p02825>
- Gephart, J. W., & Forsyth, D. W. (1984). An improved method for determining the regional stress tensor using earthquake focal mechanism data: Application to the San Fernando earthquake sequence. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 89(B11), 9305–9320. <https://doi.org/10.1029/JB089iB11p09305>
- González, F. (2020). Seismicity and focal mechanisms in the Panama microplate. *Journal of South American Earth Sciences*, 99.
- Guendel, F. y Protti, M. (1998). Sismicidad y sismotectónica de América Central. *Física de la Tierra*, 10, 19-51.
- Hardy, N.C., Heath, R.P., Westbrook, G.K. (1990). A complex plate boundary south of the Gulf of Panama (abstract). *EOS transactions. Am. Geophys. Union* 71, 1593
- Heidbach, O., Barth, A., Müller, B., Reinecker, J., Stephansson, O., Tingay, M., & Zang, A. (2016). *WSM quality ranking scheme, database description, and analysis guidelines for stress indicators* (World Stress Map Technical Report 16-01). GFZ German Research Centre for Geosciences. <https://doi.org/10.2312/wsm.2016.001>



- Heidbach, O., Rajabi, M., Di Giacomo, D., Harris, R., Lammers, S., Morawietz, S., & Ziegler, M. (2025). World Stress Map database release 2025. GFZ Data Services. <https://doi.org/10.5880/WSM.2025.001>
- Ho, D. (2026). *Notepad++* (versión 8.9.1) [Software de computación]. Disponible en notepad-plus-plus.org. <https://notepad-plus-plus.org/>
- Ishibe, K., & Shimazaki, K. (2009). Characteristics of the stress field in Japan inferred from focal mechanism data. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 114, B03308. <https://doi.org/10.1029/2008JB005808>
- Jaeger, J. C., Cook, N. G. W., & Zimmerman, R. (2007). *Fundamentals of rock mechanics* (4th ed.). Blackwell Publishing.
- Jaeger, J. C., & Cook, N. G. W. (1979). *Fundamentals of rock mechanics*. Chapman and Hall.
- Kellogg, J. N., Ogujiofor, J., & Kansakar, D. R. (1985). Cenozoic tectonics of the Panama–North Andes blocks. *Memorias del Congreso Latinoamericano de Geología*, 6, 1–40.
- Kobayashi, D., LaFemina, P., Geirsson, H., Chichaco, E., Ábrego, A. A., Mora, H., & Camacho, E. (2014). Kinematics of the western Caribbean: Collision of the Cocos Ridge and upper plate deformation. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 15(5), 1671–2094. <https://doi.org/10.1002/2014GC005234>
- López, A. (2018). Estados de esfuerzos-sur-Honduras. Universidad Latina de Costa Rica. Centro de investigaciones en Ciencias Geológicas, Ingeniería Civil, Costa Rica. [Presentación ppt] <https://fisica.unah.edu.hk/dmsdocument/9483-estado-de-esfuerzos-sur-honduras-pdf>
- Michael, A. J. (1984). Determination of stress from slip data: Faults and folds. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 89(B13), 11517–11526. <https://doi.org/10.1029/JB089iB13p11517>
- Molina, E., Marroquín, G., Escobar, J., Lindholm, C., Escibano, J., & Escalante P., M. (2008). Evaluación regional de la amenaza sísmica en Centro América AL09-PID-23. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid.
- Morandi, M., & Choy, J., & Osechas, C. (2001). Mecanismos focales sísmicos y esfuerzos tectónicos en la región Norte de Los Andes Merideños, Venezuela. *Interciencia*. 26. 201-209.



- Morell, K.D. (2016). Seamount, ridge and transform subduction in southern Central America. *Tectonics* 35 (2) <https://doi.org/10.1002/2015TC003950>
- Ottemöller, L., Voss, P. & Havskov, J. (2024). *SEISAN earthquake analysis software manual* for Windows, Linux, and MacOS Version 13.52. <https://seisan.info/man/seisan.pdf>
- Pérez, O. J., Alvarado, G. E., & Segura, J. (2018). Stress field and tectonic regimes in southern Central America inferred from earthquake focal mechanisms. *Journal of South American Earth Sciences*, 85, 1–15. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2018.05.004>
- Pollard, D. D., & Aydin, A. (1988). Progress in understanding jointing over the past century. *Geological Society of America Bulletin*, 100(6), 1181–1204. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1988\)100<1181:PIUJOT>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1988)100<1181:PIUJOT>2.3.CO;2)
- Quintero, R., Zahradník, J., Guendel, F., Campos-Durán, D., Alvarado, G., & Toral Boutet, J. (2023). Subduction transition and relation to upper plate faults revealed by the 2019 Mw 6.0 and 6.2 Costa Rica–Panama earthquakes. *Tectonophysics*. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2023.229759>
- Rajabi, M., Lammers, S., and Heidbach, O. (2025). WSM database description and guidelines for analysis of horizontal stress orientation from borehole logging, WSM *Technical Report TR 25-01*, GFZ Helmholtz Centre for Geosciences, Potsdam,, <https://doi.org/10.48440/wsm.2025.001>
- Sanjur, J., Tapia, A., & Luque, N. (2025). Determinación de mecanismos focales compuestos para la región del sistema de fallas Azuero–Soná, Panamá. *Tecnociencia*, 27(1), 196–211. <https://doi.org/10.48204/j.tecno.v27n1.a6649>
- Shearer, P. M. (2019). *Introduction to Seismology* (3rd ed.). Cambridge University Press.
- Snoke, J. A., Munsey, J. W., Teague, A. G., & Bollinger, G. A. (1984). A program for focal mechanism determination by combined use of polarity and SV-P amplitude ratio data.
- Susukida, Y., Katsumata, K., Ichiyanagi, M., Ohzono, M., Aoyama, H., Tanaka, R., Takada, M., Yamaguchi, T., Okada, K., & Takahashi, H. (2021). Focal mechanisms and the stress field in the aftershock area of the 2018 Hokkaido Eastern Iburi earthquake (MJMA 6.7). *Earth, Planets and Space*, 73, 1. <https://doi.org/10.1186/s40623-020-01323-x>



- Tar buck, E. J., & Lutgens, F. K. (2011). *Earth: An introduction to physical geology* (9th ed.). Pearson.
- Vásquez Guardia, F., Camacho Astigarrabia, E., & Rodríguez, A. (2021). Sismotectónica del occidente de la provincia de Chiriquí a partir de datos de una red sismológica local. *Tecnociencia*, 23(2), 72–92.
- Vásquez Pachón, D. A. (2019). *Estudio de orientación de esfuerzos sísmicos en el nido de Bucaramanga* [Tesis de pregrado, Universidad de los Andes].
- Wessel, P., Smith, W. H. F., Scharroo, R., Luis, J. F., & Wobbe, F. (2013). Generic Mapping Tools: Improved version released. *EOS, Transactions American Geophysical Union*, 94(45), 409–410. <https://doi.org/10.1002/2013EO450001>
- Zoback, M. L. (1992). First- and second-order patterns of stress in the lithosphere: The World Stress Map Project. *Journal of Geophysical Research*, 97(B8), 11703–11728. <https://doi.org/10.1029/92JB00132>





Briófitas corticícolas del Parque Nacional Camino de Cruces, Panamá

Corticulous bryophytes of the Camino de Cruces National Park Panama

Melissa R. Toribio

Universidad de Panamá, Facultad de Ciencias Naturales, Exactas y Tecnología, Escuela de Biología, Panamá.
melissa.rodriguez@up.ac.pa <https://orcid.org/0009-0000-4135-0240>

Nayda Flores

Universidad de Panamá, Facultad de Ciencias Naturales, Exactas y Tecnología, Departamento de Botánica, Panamá. nayda.flores@up.ac.pa <https://orcid.org/0000-0002-5258-3004>

Carlos P. Guerra Torres

Universidad de Panamá, Proyecto Alianza Panameña de la Torre de Observación de Carbono (PANACOTA), Panamá. guerrcarlos@gmail.com <https://orcid.org/0000-0001-5489-9216>

Fecha de recepción: 20 de febrero de 2025

Fecha de aceptación: 14 de mayo de 2026

DOI: <https://doi.org/10.48204/j.tecno.v8n2.a10895>

RESUMEN

Se estudió la riqueza, composición y distribución vertical de briófitas corticícolas en el Parque Nacional Camino de Cruces (PNCC), con el objetivo de determinar la diversidad alfa de briófitas en un bosque de tierras bajas de Panamá. El muestreo se realizó dentro de una parcela de 1ha, en diez árboles mayores a 10 cm de DAP (diámetro a la altura del pecho). Se realizaron colectas de briófitas en los cuatro puntos cardinales y en dos niveles de altura en cada árbol. El muestreo generó 330 registros, identificando 22 especies en 12 familias. De estas especies, 18 corresponden a musgos y cuatro a hepáticas. Las familias más diversas fueron Thuidiaceae con cuatro especies, seguida por Lejeuneaceae y Calymperaceae con tres especies cada una. Las cuatro formas de vida predominantes fueron, tapiz con 41%, seguido de césped corto, cola y tapiz liso, cada una con 14%. El 59 % de las especies son generalistas y 41 % son epífitas de sombra. El 27 % de las especies presentan una distribución neotropical. Este trabajo contribuye a llenar los vacíos de información sobre la diversidad de los bosques de tierras bajas, debido a la escasez de datos sobre briófitas en este tipo de bosques.



PALABRAS CLAVE

Bosques de tierras bajas, corticícolas, formas de vida, hepáticas, musgos.

ABSTRACT

We studied the richness, composition and vertical distribution of corticolous bryophytes in the Camino de Cruces National Park (PNCC), in order to determine the alpha diversity of bryophytes in a Panamanian lowland forest. Sampling was carried out within a 1-ha plot, on ten trees with a BHD greater than 10 cm. We collected bryophytes in all four cardinal points and at two height levels of each tree. 330 registries resulted from sampling, identifying 22 species within 12 families. 18 species corresponded to mosses and 4 to liverworts. The most diverse families include Thuidiaceae, with 4 species; followed by Lejeuneaceae and Calymperaceae, with three species each. The four predominant life-forms were: mat (41%), short turf, tail and smooth mat, each with 14%. 59% of species are generalists, while 41% are shade epiphytes. 27% of species have a neotropical distribution. This work contributes in filling the gaps in information on lowland forests' diversity, due to the limited amount of data regarding bryophytes in this type of forest.

KEYWORDS

Lowland forests, corticolous, life forms, liverworts, mosses.

INTRODUCCIÓN

Las briófitas representan a un grupo de plantas terrestres que surgió en el Cámbrico-Ordovicio tardío, hace aproximadamente 480 millones de años (Bechteler *et al.*, 2023; Harris *et al.*, 2022). Se distinguen por su sistema de conducción de agua y alimentos, en general poco desarrollado, por la ausencia de raíces, hojas y tallos verdaderos y en especial, por su ciclo de vida que es único entre todas las plantas, ya que el esporófito es reducido y depende en gran medida del gametófito para su desarrollo y nutrición, siendo este último, la generación dominante (Gradstein *et al.*, 2001).

Son plantas de hábitats húmedos, están presentes en gran variedad de sustratos que incluyen suelo, corteza de árboles, hojas, rocas, madera en descomposición, estiércol y cadáveres de animales (Vanderpoorten & Goffinet, 2009). A nivel mundial, las briófitas incluyen aproximadamente 15 000 especies y comprenden 3 divisiones, Bryophyta (musgos), Marchantiophyta (hepáticas) y Anthocerothophyta (antocerotes) (Gradstein *et al.*, 2001). En Panamá, se registran 752 especies de musgos, 491 especies de hepáticas y 17 especies de antocerotes (Salazar Allen *et al.*, 2022).

Por su dependencia a la humedad, las briófitas son plantas que presentan mayor crecimiento y abundancia en los bosques nubosos de tierras altas, razón por la cual la mayoría de los estudios se han realizado en este tipo de bosques (Chung, 1995; Acebey *et*



al., 2003; Costa & Lima, 2005; Rodríguez-Quiel *et al.*, 2010, 2019; Guerra *et al.*, 2020; Rodríguez-Quiel *et al.*, 2022). Uno de los estudios preliminares de la flora de musgos de Panamá (Salazar Allen & Crosby, 1985), establece que la mayor cantidad de especies se encuentra entre los 800 m y 2 600 m de altitud, en las provincias de Darién y Chiriquí.

Los estudios en bosques de tierras bajas siguen siendo escasos, a pesar de que el 70 % del país presenta alturas por debajo de los 700 metros (ANAM-BID, 2010). En isla Barro Colorado se reportaron 81 especies de musgos, siendo las familias más diversas Hookeriaceae, Fissidentaceae y Calymperaceae (Salazar Allen *et al.*, 1991).

En otro estudio realizado por Gradstein & Salazar Allen (1992), en el gradiente altitudinal de Cerro Pirre en Darién, se encontró mayor cantidad de hepáticas, unas 86 especies de las cuales 19 especies eran de tierras bajas (0 m - 100 m). Salazar Allen & Chung (1997), reportaron en el Parque Nacional Coiba un total de 56 especies distribuidas en 49 especies de musgos, 7 especies de hepáticas y un solo género de antocerotes (*Notothylas*).

Dauphin *et al.* (2022), en Isla Barro Colorado, reportaron 85 especies de hepáticas, la mayoría de la familia Lejeuneaceae. Salazar Allen *et al.* (2022), registraron 26 especies de hepáticas y siete especies de musgos en los manglares de la provincia de Bocas del Toro.

Este estudio se realizó con la finalidad de determinar la diversidad y composición de briófitas corticícolas en el Parque Nacional Camino de Cruces (PNCC). Este estudio es de importancia porque permitirá llenar los vacíos de información sobre la diversidad en los bosques de tierras bajas, además ampliará el conocimiento sobre la diversidad de briófitas de Panamá.

MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se realizó en el Parque Nacional Camino de Cruces (PNCC), ubicado en el corregimiento de Ancón, distrito de Panamá, provincia de Panamá (Figura 1). El área protegida posee una superficie de 4 780 ha, de acuerdo con la resolución N° DM-0392-2016 el área de estudio se encuentra en el polígono CD01-04 (Ministerio de Ambiente, 2016).

El PNCC presenta un Bosque Húmedo Tropical (bh-T), según las zonas de vida de Holdridge, presenta temperaturas de 24 °C a 26 °C y precipitación de 1 850 mm – 3 400 mm (ANAM-BID, 2010; IGNTG, 2016). Según el sistema de la UNESCO para Panamá, la clasificación del tipo de vegetación para el área de estudio corresponde a bosquesemicaducifolio tropical de tierras bajas bastante intervenido (ANAM-BID, 2010; IGNTG, 2016).

Muestreo, recolección e identificación taxonómica

El muestreo consistió en colectas de briófitas corticícolas dentro de una parcela de 500 m x 20 m en la época lluviosa. Modificando el protocolo de Gradstein *et al.* (2003), se seleccionaron 10 árboles de diferentes familias y especies, mayores a 10 cm de DAP



(diámetro a la altura del pecho). Cada árbol fue georreferenciado, utilizando un GPS y se marcó con cinta reflectiva. En cada árbol se efectuaron colectas en los cuatro puntos cardinales en dos niveles de altura (0 cm-100 cm y 101 cm-200 cm). Para determinar la cobertura de briófitas se colocó una cuadrícula 20 cm x 30 cm en cada nivel. La distribución de las especies en los dos niveles de altura del hospedador, se clasificaron según los grupos ecológicos, de acuerdo con su tolerancia a la intensidad lumínica en generalistas, epífitas de sol y epífitas de sombra (Cornelissen & Steege, 1989; Dos Santos *et al.*, 2011; Fagundes *et al.*, 2016; Gradstein *et al.*, 2001).

Figura 1

Ubicación geográfica del Parque Nacional Camino de cruces, fuente ArcGIS 2024



Se determinaron las formas de vida de las briófitas corticícolas de acuerdo con Bates (1998) y Delgadillo *et al.* (2022). Para la identificación de las briófitas se utilizó un microscopio binocular Olympus CX21 y un estereomicroscopio Olympus SZ. Las especies fueron identificadas utilizando literatura especializada para musgos y hepáticas (Allen, 1994, 2010,



2018; Gradstein, 2001, 2021; Gradstein & Da Costa, 2003; Sharp *et al.*, 1994; Reiner-Drehwald, 1995).

La clasificación taxonómica sigue a Churchill *et al.* (2020) para Bryophyta (musgos) y Grandall-Stotler *et al.* (2009) para Marchantiophyta (hepáticas). La distribución mundial de especies de musgos se basa en el sitio web del Tropicos (<http://www.tropicos.org/NameSearch.aspx>), Andean Bryophytes (<http://legacy.tropicos.org/projectwebportal.aspx?pagename=Home&projectid=21>) y para las hepáticas (Gradstein, 2021). El material identificado fue comparado e incorporado a la Sección de Briófitas y Líquenes del Herbario de la Universidad de Panamá (PMA).

RESULTADOS

A partir de 330 muestras recolectadas en diez árboles dentro de la parcela se registraron 22 especies, distribuidas en 16 géneros y 12 familias. De estas especies, 18 (81,8%) corresponden a musgos y 4 (18,2 %) a hepáticas. Los musgos estuvieron representados con 12 géneros y 10 familias, las hepáticas con 4 géneros y 2 familias.

Las seis familias más diversas, comprenden el 73,9 % (17 especies) de la riqueza total y el 26,1 % (5 especies) de las familias restantes están representadas por una especie. Thuidiaceae fue la más diversa con cuatro especies, seguida por Lejeuneaceae y Calymperaceae con tres especies cada una y Fissidentaceae, Neckeraceae y Pilotrichaceae con dos especies cada una (Figura 2).

La distribución geográfica muestra 6 especies (27 %) son del neotrópico, seguido de la región Pantropical y África-América Tropical con 5 especies (23%) cada una, continua América tropical con 4 especies (18 %) y una especie para Mesoamérica y Asia-América Tropical (tabla 1). Se registraron 7 formas de vida, la predominante fue tapiz con 9 especies (41%), seguido de césped corto, cola y tapiz liso, cada uno con 3 especies (14%), abanico con 2 especies (9%) y una especie (4%) para las formas dendroide y pendiente. Los musgos acrocárpicos mostraron dos formas de vida, abanicos y césped corto, en cambio los pleurocárpicos cuatro formas de vida: cola, dendroide, pendiente y tapiz (Figura 3). Las formas de vida predominantes para musgos pleurocárpicos fueron el tapiz y para musgos acrocárpicos fue césped corto. Las hepáticas fueron representadas por una sola forma de vida, el tapiz liso (tabla 2). En cuanto a los grupos ecológicos, el 59 % de las especies son generalistas y 41% son epífitas de sombra. El grupo de las epífitas de sol no estuvo representado por ninguna especie.

Figura 2

Riqueza de briófitas corticícolas del Parque Nacional Camino de Cruces



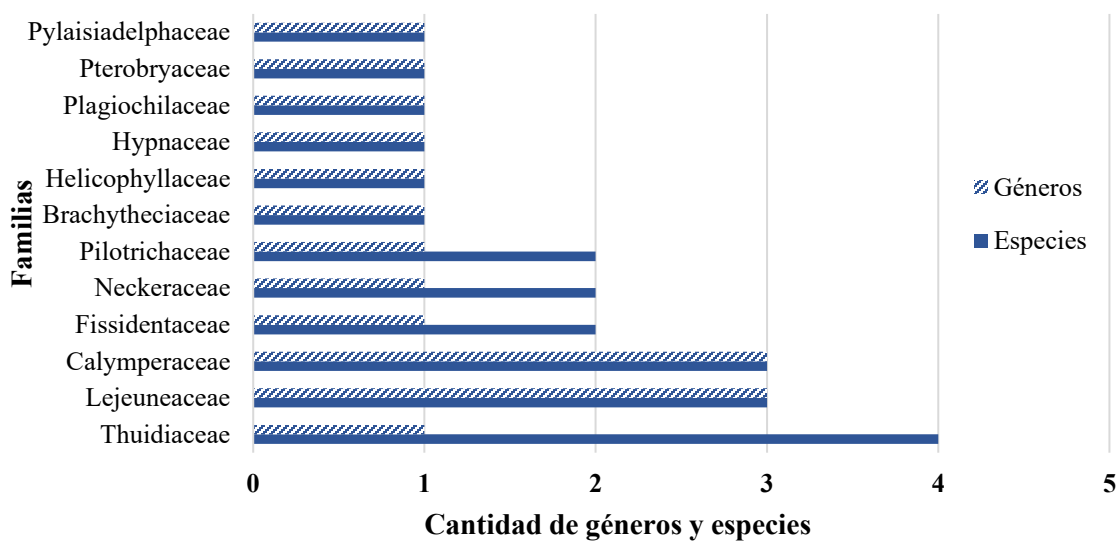
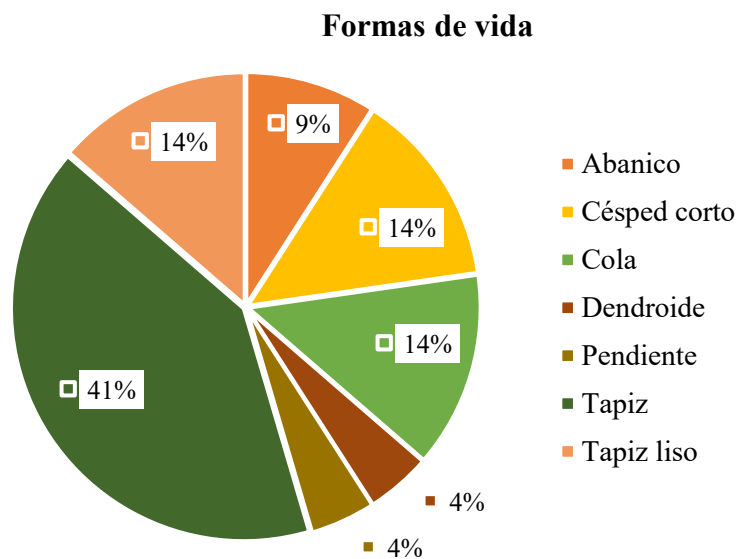


Figura 3
Formas de vida de briófitas corticícolas en el PNCC.

Tabla 1
Especies de briófitas corticícolas. El primer número dentro del paréntesis indica el número de géneros; el segundo número el de las especies en sus respectivas familias. Neo= neotropical, Pan= Pantropical, Áfri y Amé= África y América tropical, Asi y Amé= Asia y América tropical, Mes= Mesoamérica. Grupos ecológicos, Gen= generalistas y Eps= Epífitas de sombra.



División Bryophyta			
Familias	Especies	Distribución Mundial	Grupos ecológicos
Brachytheciaceae (1/1)	<i>Zelometeorium recurvifolium</i> (Hornsch.) Manuel	Neo	Gen
Calymperaceae (3/3)	<i>Calymperes afzelii</i> Sw.	Pan	Gen
	<i>Octoblepharum albidum</i> Hedw.	Pan	Gen
	<i>Syrrhopodon incompletus</i> Schwägr. var. <i>incompletus</i>	Áfri-Amé	Gen
Fissidentaceae (1/2)	<i>Fissidens pallidinervis</i> Mitt.	Áfri-Amé	Gen
	<i>Fissidens zollingeri</i> Mont.	Pan	Gen
Helicophyllaceae (1/1)	<i>Helicophyllum torquatum</i> (Hook.) Brid.	Neo	Gen
Hypnaceae (1/1)	<i>Chryso-hypnum diminutivum</i> (Hampe) W.R. Buck	Neo	Gen
Neckeraceae (1/2)	<i>Neckeropsis disticha</i> (Hedw.) Kindb.	Áfri-Amé	Gen
	<i>Neckeropsis undulata</i> (Hedw.) Reichardt	Asi-Amé	Gen
Pilotrichaceae (1/2)	<i>Callicostella pallida</i> (Hornsch.) Ångstr.	Amé	Eps
	<i>Callicostella callicostelloides</i> (Herzog & Thér.) B. H. Allen	Mes	Eps
Pterobryaceae (1/1)	<i>Pirella pohlii</i> (Schwägr.) Cardot	Amé	Eps
Pylaisiadelphaceae (1/1)	<i>Taxithelium planum</i> (Brid.) Mitt.	Áfri-Amé	Gen
Thuidiaceae (1/4)	<i>Pelekium involvens</i> (Hedw.) Touw	Áfri-Amé	Eps
	<i>Pelekium scabrosulum</i> (Mitt.) Touw	Neo	Eps
	<i>Pelekium schistocalyx</i> (Müll. Hal.) Touw	Neo	Eps
	<i>Pelekium</i> sp.	Neo	Eps
División Marchantiophyta			
Lejeuneaceae (3/3)	<i>Caudalejeunea lehmanniana</i> (Gottsche) A. Evans	Pan	Gen
	<i>Lejeunea</i> sp.	Pan	Gen
	<i>Xylolejeunea crenata</i> (Nees & Mont.) X.L. He & Grolle	Amé	Eps
Plagiochilaceae (1/1)	<i>Plagiochila disticha</i> (Lehm. & Lindenb.) Lehm. & Lindenb.	Amé	Gen

Tabla 2

Briófitas corticícolas según la posición del esporofito y formas de vida. Esporófito, Acr = acrocárpico, Ple = pleurocárpico; Formas de vida, Aba = abanico, Ces = césped, Col = cola, Den = dendroide, Pend = Pendiente, Tap = Tapiz y Tapl = tapiz liso; Voucher, MR=Melissa Rodríguez, na= no aplica.



División Bryophyta	Esporófito	Formas de vida	Voucher
<i>Callicostella callicostelloides</i> (Herzog & Thér.) B. H. Allen	Ple	Tap	MR121
<i>Callicostella pallida</i> (Hornsch.) Ångstr.	Ple	Tap	MR120
<i>Calymperes afzelii</i> Sw.	Acr	Ces	MR139
<i>Chryso-hypnum diminutivum</i> (Hampe) W.R. Buck	Ple	Tap	MR362
<i>Fissidens pallidinervis</i> Mitt.	Acr	Aba	MR218
<i>Fissidens zollingeri</i> Mont.	Acr	Aba	MR164
<i>Helicophyllum torquatum</i> (Hook.) Brid.	Ple	Tap	MR198
<i>Neckeropsis disticha</i> (Hedw.) Kindb.	Ple	Col	MR256
<i>Neckeropsis undulata</i> (Hedw.) Reichardt	Ple	Col	MR212
<i>Octoblepharum albidum</i> Hedw.	Acr	Ces	MR223
<i>Pelekium involvens</i> (Hedw.) Touw	Ple	Tap	MR309
<i>Pelekium scabrosulum</i> (Mitt.) Touw	Ple	Tap	MR261
<i>Pelekium schistocalyx</i> (Müll. Hal.) Touw	Ple	Tap	MR375
<i>Pelekium</i> sp.	Ple	Tap	MR260
<i>Pirella pohlii</i> (Schwägr.) Cardot	Ple	Den	MR286
<i>Syrhropodon incompletus</i> Schwägr. var. <i>incompletus</i>	Acr	Ces	MR392
<i>Taxithelium planum</i> (Brid.) Mitt.	Ple	Tap	MR129
<i>Zelometeorium recurvifolium</i> (Hornsch.) Manuel	Ple	Pend	MR371
División Marchantiophyta			
<i>Caudalejeunea lehmanniana</i> (Gottsche) A. Evans	na	Tapl	MR421
<i>Lejeunea</i> sp.	na	Tapl	MR266
<i>Plagiochila disticha</i> (Lehm. & Lindenb.) Lindenb.	na	Col	MR377
<i>Xylolejeunea crenata</i> (Nees & Mont.) X.L. He & Grolle	na	Tapl	MR373

Los nuevos registros de briófitas corticícolas para el PNCC se describen brevemente en orden alfabético. La información del sustrato fue extraída de la literatura especializada (Allen, 1994, 2010, 2018) y de la base de datos BRAHMS del Herbario de la Universidad de Panamá (PMA). De igual forma, la distribución en Panamá fue recopilada de la base de datos del Herbario y tienen el siguiente formato: provincia, sitio, apellido del colector, número del colector y el herbario donde reposan las muestras.

1. *Callicostella callicostelloides* (Herzog & Thér.) B.H. Allen

Caracterizada por hojas onduladas cuando están secas, márgenes irregularmente serrados; costa doble; células lisas, oblongo-hexagonales. Sustratos: Sobre rocas húmedas a lo largo de arroyos, troncos en descomposición, base de árboles y lianas. Distribución: Coclé, Cerro



Turega: Gudiño 2015-11 (PMA); Colón, Santa Rita: Crosby 10301 (MO); Veraguas, Salazar:12844 (PMA).

2. *Callicostella pallida* (Hornsch.) Ångstr.

Caracterizada por hojas flexuosas cuando secas, márgenes regularmente serrados; costa doble; células unipapilosas, isodiamétricas. Sustratos: En troncos podridos, troncos de árboles, ramas y rocas cerca o en arroyos. Distribución: Chiriquí, Fortuna: Salazar 4159 (PMA); Coclé, Río Antón: Salazar 936 (PMA); Darién, Cerro Pirre: Torre SN 43 (PMA); Panamá, Zona del Canal: Nee 9421(PMA, MO); Panamá Oeste, Cerro Campana: Correa 4740 (PMA).

3. *Calymperes afzelii* Sw.

Hojas involutas cuando están secas, lanceoladas desde una base con hombros; márgenes engrosados aserrados; teniola conspicua; cancelina terminando distalmente en ángulos agudos. Sustratos: En troncos de árboles, raíces expuestas, rocas y suelo. Distribución: Coclé, El Valle de Antón: Salazar 940 (PMA); Darién, Chepigana: Antonio 4222 (PMA, MO); Los Santos, Tonosí: McPherson 13508 A (PMA, MO); Panamá, Cerro Ancón: Allen 4904 (PMA, MO); Veraguas, Isla Jicarón: Salazar 53 (PMA).

4. *Caudalejeunea lehmanniana* (Gottsche) A. Evans

Plantas con merófito de 4 células de ancho; hojas incubas, trígonos cordados; ocelos ausentes. Lóbulos con 1-2 dientes; anfigastros emarginados. Perianto cordado con 2 quillas laterales y 1 ventral. Sustratos: Sobre hojas vivas, troncos de árboles, ramas. Distribución: Coclé, El Copé: Meijer 173 (PMA); Panamá, Isla Barro Colorado: Salazar 5906 (PMA); Panamá Oeste, Campana: Polanco 3848, (PMA); Veraguas, Isla Jicarón: Villarreal 33 (PMA).

5. *Chryso-hypnum diminutivum* (Hampe) W.R. Buck

Caracterizada por hojas con márgenes serrulados; costa corta y bifurcada; células lineales, proradas en los extremos superiores e inferiores; células alares cuadradas de 3 a 6 filas. Sustratos: Sobre troncos o ramas de árboles, troncos podridos, rocas y suelo. Distribución: Chiriquí, Bajo Boquete: Salazar 901 (PMA); Coclé, Cerro Tigreiro: Salazar 19514 (PMA); Darién: Allen 8719 (MO, PMA); Panamá, Zona del Canal: Crosby 4323 (MO); Panamá Oeste, Cerro campana: Lara 1208 (PMA); Veraguas, Cerro Hoya: Flores 307 (PMA).

6. *Fissidens pallidinervis* Mitt.

Hojas elimbadas; costa que termina 3 a 5 células por debajo del ápice; células pluripapilosas, 2 a 4 papilas. Lámina vaginante, con limbo restringidos a la parte basal de las hojas superiores de la planta periquecial. Sustratos: Terrestre, sobre piedra y troncos.



Distribución: Darién, Parque Nacional Darién: Allen 8630 (MO); Panamá, Sendero de Interpretación: Salazar 6638 (PMA); Panamá, Isla de Taboga: Welch 19906 (NY).

7. *Fissidens zollingeri* Mont.

Caracterizada por márgenes enteros, limbado, confluyente en el ápice; costa corta excurrente; células lisas, lámina vaginante. Sustratos: Terrestre, sobre piedra y troncos. Distribución: Bocas del Toro, Río Changuinola: Salazar 1758 (PMA); Coclé: Antón, Gómez 7 (PMA); Colón, Galeta: Salazar 20799 (PMA); Panamá, Bayano: Salazar 992 (PMA); Panamá Oeste, Capira: Salazar 6799 (PMA).

8. *Helicophyllum torquatum* (Hook.) Brid.

Caracterizada por hojas dimórficas, hojas ventrales y dorsales, cada una con hojas mediales y laterales, incurvadas cuando están secas, márgenes con borde liso y hialino; costa simple terminando por debajo del ápice; células unipapilosas. Sustratos: Sobre troncos y corteza de palmas. Distribución: Chiriquí, Santa Marta: Salazar 1508 (PMA); Panamá, Parque Nacional Soberanía: Gudiño 390 (PMA); Veraguas, Soná: Flores 739 (PMA).

9. *Lejeunea* sp.

Plantas con merófito de 2 células de ancho; hojas con lobos ovados, márgenes enteros; trígonos pequeños; ocelos ausentes. Lóbulos hinchados, con un diente; anfigastros bifidos. Sustratos: Sobre hojas vivas, arbustos, troncos en descomposición, tronco y suelo.

10. *Neckeropsis disticha* (Hedw.) Kindb.

Caracterizada por hojas crespas cuando están secas, márgenes crenulados, doblez en un lado de la base; costa simple; células lisas; células alares poco diferenciadas. Sustratos: En troncos de árboles, raíces, ramas, rocas y sobre suelo húmedo. Distribución: Bocas del Toro, Río Changuinola: Salazar 176 (PMA); Coclé, Coclesito: Salazar 12353 (PMA); Colón, Galeta: Salazar 20827 (PMA); Darién, Pinogana: Salazar 2022 (PMA); Panamá, Isla Majé: Salazar 495 (PMA).

11. *Neckeropsis undulata* (Hedw.) Reichardt

Caracterizada por hojas onduladas cuando están húmedas o secas, márgenes crenulados, aurícula en la base; costa simple; células lisas; células alares poco diferenciadas. Sustratos: En troncos de árboles, ramas, ramitas y enredaderas, troncos caídos y ocasionalmente en rocas. Distribución: Bocas del Toro: Allen 5818 (PMA, MO); Chiriquí, Fortuna: Salazar 534 (PMA); Darién, Marragantí: Williams 1050 (PMA); Panamá, Isla Barro Colorado: Salazar 5867 (PMA); Panamá Oeste, Río Caimito: Crosby 4549 (PMA, MO); Veraguas, Cerro Hoya: Cuadra 402 (PMA).

12. *Octoblepharum albidum* Hedw.

Plantas con hojas lingüiformes, márgenes enteros; costa ensanchada simple, en sección transversal compuesta de clorocistos y leucocistos, con 3 a 4 capas de leucocistos a ambos



lados de los clorocistos los cuales forman una fila irregular en zig-zag. Sustratos: En corteza (particularmente de palmeras), en la base de árboles y arbustos, troncos en descomposición, suelo y rocas. Distribución: Bocas del Toro, Changuinola: Salazar 1715 (PMA); Colón, Santa Rita: Dressler 3740 (PMA, MO); Darién, Cerro Pirre: Salazar 9321 (PMA); Herrera, Ocú: Moreno 18 (PMA); Los Santos, Tonosí: Rivera 74 (PMA); Panamá, Isla Barro Colorado: Arrocha 342 (PMA).

13. *Pelekium involvens* (Hedw.) Touw

Plantas con tallos 1- pinnados, paráfilos; hojas curvadas cuando están secas, márgenes crenulados; costa simple, células pluripapilosas; hojas periqueciales, enteras o pocos dientes, no ciliadas. Sustratos: En troncos de árboles, raíces expuestas y rocas. Distribución: Chiriquí: Salazar 1259 (PMA); Darién, Cerro Pirre: Salazar 2021 (PMA); Panamá, Isla Barro Colorado: Arrocha 289 (PMA); Isla Majé, Salazar 741 (PMA); Zona del Canal, Nee 7316, (PMA, MO).

14. *Pelekium scabrosulum* (Mitt.) Touw

Plantas con tallos bipinnados, paráfilos; hojas curvadas cuando están secas, márgenes crenulados; costa simple; células pluripapilosas; hojas periqueciales serruladas a escasamente ciliadas cortas. Sustratos: Sobre troncos, raíces expuestas, troncos en descomposición y rocas. Distribución: Panamá, Isla Barro Colorado: Salazar 5790 (PMA).

15. *Pelekium schistocalyx* (Müll. Hal.) Touw

Plantas con tallos bipinnados, paráfilos; hojas curvadas cuando están secas, márgenes crenulados; costa simple; células pluripapilosas; hojas periqueciales, fuertemente ciliadas. Sustratos: Sobre troncos, raíces expuestas, troncos en descomposición y rocas. Distribución: Darién, Cerro Pirre: Torre SN 40 (PMA); Panamá, Isla Barro Colorado: Arrocha 329 (PMA); Panamá Oeste, Arraiján: Torres SN A31 (PMA); Veraguas, Isla Coiba: Salazar 49 (PMA).

16. *Pirella pohlii* (Schwägr.) Cardot

Caracterizada por tallos secundarios erectos, estipitados; hojas erectas-extendidas, márgenes serrulados; costa simple; células lisas a proradas, lineales; células alares apenas desarrolladas, de unas pocas células subcuadradas. Sustratos: Sobre troncos de árboles, arbustos y troncos en descomposición. Distribución: Coclé, Coclesito: Salazar 12358 (PMA); Darién, Cerro Chucantí: Sierra 941 (PMA); Los Santos, Tonosí: McPherson 13508 (PMA, MO); Panamá, Isla Barro Colorado: Salazar 4533 (PMA); Panamá Oeste, Campana: Mežaka 71 (PMA); Veraguas, Cerro Hoya: Flores 292 (PMA).

17. *Plagiochila disticha* (Lehm. & Lindenb.) Lehm. & Lindenb.

Plantas con hojas súcubas, alternas, oblongas, base ventral dentada, 5 a 10 dientes lineares, base dorsal decurrente; células con trígonos conspicuos; anfigastros ausentes. Sustratos: Sobre corteza y roca. Distribución: Panamá Oeste, Cerro Campana: Salazar 6873 (PMA);



Panamá, Llano-Cartí: Dwyer 11911 (PMA); Panamá, Isla Barro Colorado: Salazar 4627 (PMA).

18. *Syrrhopodon incompletus* Schwägr. var. *incompletus*

Plantas con hojas curvadas cuando están secas; márgenes engrosados, con dientes en pares; costa percurrente, teniola ausente; cancelina persistente. Sustratos: Sobre troncos de árboles y palmeras. Distribución: Coclé, Cerro Pilon: Crosby 4441 (PMA, MO); Comarca Guna Yala: Allen 4962 (PMA, MO); Darién, Cerro Malí: Mori 4371 (PMA, MO); Panamá, Isla Barro Colorado: Salazar 6590 (PMA); Panamá Oeste, Altos de Campana: Lara 906 (PMA); Veraguas, Isla Coiba: Antonio 2277 (PMA).

19. *Taxithelium planum* (Brid.) Mitt.

Caracterizada por hojas complanadas, cóncavas, ecostadas, márgenes aserrados; células pluripapilosas, papilas seriadas; región alar diferenciada, células cuadradas. Sustratos: Sobre rocas, troncos, ramas y raíces de árboles, arbustos y troncos en descomposición. Distribución: Bocas del toro: Allen 5339 (PMA, MO); Chiriquí, Fortuna: Salazar 5419 (PMA); Colón, Santa Rita: Hammel 3634 (PMA, MO); Darién, Cerro Pirre: Salazar 9339 (PMA); Los Santos, Pedasí: Velásquez SN (PMA); Panamá, Ancón: Crosby 4314 (PMA, MO); Panamá Oeste, Altos de Campana: Chung 640 (PMA), Veraguas, Cerro Hoya: Cuadra 53 (PMA).

20. *Xylolejeunea crenata* (Nees & Mont.) X.L. He & Grolle

Plantas sin hialodermis; merófito ventral con 2 células de ancho; márgenes crenulados; células isodiamétricas, triángulos pequeños; ocelos grandes, 2 a 4 en fila transversal en la mitad inferior del lobo de la hoja. Lóbulos con 1 a 2 dientes; anfigastros bifidos; Periantos con 5 quillas. Sustratos: Sobre madera podrida, troncos en el sotobosque sombreado. Distribución: Darién, Cerro Pirre: Salazar 9262 (PMA).

21. *Zelometeorium recurvifolium* (Hornsch.) Manuel

Plantas pendientes, hojas de los tallos amplexantes; hojas de las ramas extendidas a escuarras, ovada a orbicular, costa doble; células lineares; células alares poco diferenciadas, subcuadradas. Sustratos: Sobre troncos, hojas y ramas caídas. Distribución: Colón, Santa Rita: Crosby 10368 (PMA, MO); Panamá, Isla Barro Colorado: Arrocha 100 (PMA); Panamá Oeste, Altos de campana: Chung 606 (PMA); Veraguas, Cerro Hoya: Salazar 16288 (PMA).

DISCUSIÓN

En el sitio de estudio, los grupos de briófitas corticícolas con mayor riqueza fueron los musgos pleurocárpicos. Según Cornelissen & Steege (1989) los musgos son comunes en la base de los árboles, mientras que las hepáticas cubren gran parte del tronco superior y las ramas gruesas del dosel inferior.



Dentro de la parcela se registraron 22 especies, algunas de estas se comparten con otros sitios de tierras bajas como Isla Barro Colorado, con la que se comparten 15 especies; y con Isla Coiba se comparten 12 especies (Salazar Allen *et al.*, 1991; Salazar Allen & Chung, 1997). En este estudio la familia de musgo más diversa fue Thuidiaceae seguida de Calymperaceae y para hepáticas fue Lejeuneaceae, similar al estudio de Dauphin *et al.* (2022).

En cuanto a los grupos ecológicos, las briófitas del PNCC de este estudio son epífitas de sombra y generalistas. Las especies generalistas son predominantes en este estudio, dado que pueden adaptarse a condiciones de estrés y muestran cambios en la estructura de la comunidad de briófitas (Souza *et al.*, 2021). En todas las etapas de sucesión ecológica se incluyen las especies generalistas, desde la etapa 1 de regeneración (0 año – 10 años) hasta la etapa 4 de bosques primarios (Takashima-Oliveira *et al.*, 2020). El segundo grupo ecológico fue el de las epífitas de sombra, que son características de bosques húmedos de áreas sombreadas (Gradstein *et al.*, 2001). La presencia de estos dos grupos ecológicos sugiere que el sotobosque en la parcela del PNCC está conservado. La falta de epífitas de sol en el sitio se debe a que son de microhábitats de dosel y a la apertura del bosque por fragmentación (Souza *et al.*, 2021).

Se registraron siete formas de vida para briófitas corticícolas en los dos niveles de altura en este estudio, que refleja la adaptación de las especies a su ambiente microclimático (Mägdefrau, 1982). La forma de vida predominante en la parcela fue el tapiz, siendo la forma de vida más común (Da Costa, 1999; Pardow *et al.*, 2012; Salazar Allen & Chung, 1997).

Las formas de vida pendientes, colas, dendroides y abanicos, son representativas de ambientes húmedos y de menos exposición a la irradiación característicos del sotobosque (Mägdefrau, 1982; Sporn *et al.*, 2010). Da Costa (1999) encontró que las formas de vida de las briófitas epífitas disminuyeron, debido a la perturbación en los bosques de tierras bajas de Brasil, lo que demuestra que son indicadores de la conservación del sitio. Las formas de vida son importantes para distinguir el bosque húmedo de tierras bajas del bosque nuboso de tierras bajas, siendo este último caracterizado por la forma pendiente en el dosel (Pardow *et al.*, 2012).

CONCLUSIONES

En el bosque de tierras bajas del Parque Nacional Camino de Cruces se registraron 22 nuevos registros de briófitas corticícolas. Las comunidades de briófitas corticícolas



presentaron diversidad de formas de vida, además de grupos ecológicos indicadores de la conservación del sitio. Conocer la diversidad y composición de briófitas corticícolas sirve de base para apoyar las acciones de conservación de los ecosistemas y grupos de plantas amenazadas, es por eso por lo que es recomendable incluir este grupo de plantas en los inventarios y planes de manejo de la biodiversidad.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue financiado por el proyecto “Establecimiento de una torre de medición directa de flujo neto de CO₂ y otros gases de efecto invernadero (GEI) en un bosque tropical panameño”, ejecutado mediante el convenio 001-67-2020 entre la Universidad de Panamá y el Ministerio de Ambiente.

Al director Dr. Rubén D. Sousa D. y personal del ICAB-UP y la Vicerrectoría de Investigación y Postgrado (VIP) por facilitar el manejo del proyecto. Al personal del Herbario PMA por apoyar el trabajo de identificación y custodia de los especímenes.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Acebey, A., Gradstein, S. R., & Krömer, T. (2003). Species richness and habitat diversification of bryophytes in submontane rain forest and fallows of Bolivia. *J. Trop. Ecol.* 19(1), 9–18. <https://doi.org/10.1017/S026646740300302X>
- Allen, B. (1994). Moss Flora of Central America. Part 1. Sphagnaceae--Calymperaceae. *Monogr. Syst. Bot. Missouri Bot. Gard.* 49.
- Allen, B. (2010). Moss Flora of Central America. Part 3. Anomodontaceae--Symphyodontaceae. *Monogr. Syst. Bot. Missouri Bot. Gard.* 117.
- Allen, B. (2018). Moss flora of Central America. Part 4. Fabroniaceae–Polytrichaceae. *Monogr. Syst. Bot. Missouri Bot. Gard.* 132.
- ANAM-BID (Autoridad Nacional del Ambiente – Banco Interamericano de Desarrollo. (2010). Atlas Ambiental de la República de Panamá. Primera edición. Novo Art, S.A. Colombia 190 págs.
- Bates, J. W. (1998). Is “Life-Form” a Useful Concept in Bryophyte Ecology? *Oikos*, 82(2), 223–237. <https://doi.org/10.2307/3546962>
- Bechteler, J., G. Peñaloza-Bojacá, D. Bell, J. G. Burleigh, S. F. McDaniel, E. C. Davis, E. B. Sessa, et al. 2023. Comprehensive phylogenomic time tree of bryophytes reveals



deep relationships and uncovers gene incongruences in the last 500 million years of diversification. *Am. J. Bot.* 110(11): e16249. <https://doi.org/10.1002/ajb2.16249>

Chung, C. C. (1995). Estudio preliminar de los musgos corticícolas en árboles y arbustos menores de 10 cm de DAP en el Sendero Panamá, Parque Nacional Altos de Campana. Tesis de Licenciatura. Universidad de Panamá.

Churchill, S. P., Aldana, C., Opisso, J., & Morales, T. (2020). Familias y géneros de los musgos de los Andes tropicales. *Missouri Bot. Gard.*

Condit, R., Aguilar, S., & Pérez, R. (2020). Trees of Panama: A complete checklist with every geographic range. *For. Ecosyst.* 7(1), 1–13. <https://doi.org/10.1186/S40663-020-00246-Z/FIGURES/7>

Cornelissen, J. H. C., & Steege, H. T. (1989). Distribution and ecology of epiphytic bryophytes and lichens in dry evergreen forest of Guyana. *J. Trop. Ecol.* 5(2), 131–150. <https://doi.org/10.1017/S0266467400003400>

Costa, D., & Lima, F. (2005). Moss diversity in the tropical rainforests of Rio de Janeiro, southeastern. *Braz. J. Bot.* 28, 671–685.

Costa, D. P. (1999). Epiphytic bryophyte diversity in primary and secondary lowland rainforests in southeastern Brazil. *The Bryologist*, 102(2), 320–326. <https://doi.org/10.2307/3244372>

Dauphin, G., Gradstein, S. R., & Allen, N. S. (2022). Liverworts and Hornworts of Barro Colorado Island, Panama. *Cryptogam. Bryol.* 43(9), 153–165. <https://doi.org/10.5252/CRYPTOGAMIE-BRYOLOGIE2022V43A9>

Delgadillo, C., Escolástico, D., Hernández, E., Herrera, P., Peña, P., & Juárez, C. (2022). Manual de Briofitas. In T. Terrazas S (Ed.), Universidad Nacional Autónoma de México (Tercera Edición). Instituto de Biología, Universidad Nacional Autónoma de México.

Gradstein, R. (2006). The lowland cloud forest of French Guiana - a liverwort hotspot. *Cryptogam. Bryol.* 27(1), 141-152.

Gradstein, R., Churchill, S. P., & Salazar Allen, N. (2001). Guide to the bryophytes of tropical America. *Mem. N. Y. Bot. Gard.* 86.



- Gradstein, R., & Da Costa, D. (2003). The Hepaticae and Anthocerotae of Brazil. Mem. N. Y. Bot. Gard. 87.
- Gradstein, R., Nadkarni, N., Krömer, T., Holz, I., & Nöske, N. (2003). A Protocol for Rapid and Representative Sampling of Vascular and Non-Vascular Epiphyte Diversity of Tropical Rain Forests. Selbyana. 24, 105-111.
- Gradstein, R., & Salazar Allen, N. (1992). Bryophyte diversity along an altitudinal gradient in Darién National Park, Panamá. Trop. Bryol. 5(1), 61-71. <https://doi.org/10.11646/BDE.5.1.10>
- Gradstein, S. R. (2021). The Liverworts and Hornworts of Colombia and Ecuador. Springer. Mem. N. Y. Bot. Gard. 121, 1-123.
- Grandall-Stotler, B., Stotler, R., & Long, D. (2009). Morphology and classification of the Marchantiophyta. In B. Goffinet & J. Shaw (Eds.), Bryophyte Biology (Second Edition). Cambridge University Press. pp. 1–54.
- Guerra, G., Arrocha, C., Rodríguez, G., Déleg, J., & Benítez, Á. (2020). Briófitos en los troncos de árboles como indicadores de la alteración en bosques montanos de Panamá. Rev. biol. trop. 68(2), 492–502. <https://doi.org/10.15517/RBT.V68I2.38965>
- Harris, B.J., Clark, J.W., Schrempf, D. *et al.* Divergent evolutionary trajectories of bryophytes and tracheophytes from a complex common ancestor of land plants. Nat. Ecol. Evol. 6, 1 634-1 643 (2022). <https://doi.org/10.1038/s41559-022-01885-x>
- Instituto Geográfico Nacional Tommy Guardia (IGNTG). (2016). Atlas Nacional de la República de Panamá.
- Margalef, R. (1972). Homage to Evelyn Hutchinson, or why is there an upper limit to diversity. Trans. Conn. Acad. 44, 211-235.
- McCarthy, R., Castillo, J., & Castillo, N. (1999). Plan de Manejo Parque Nacional Camino de Cruces, Sistema Nacional de Áreas Protegidas. Autoridad Nacional del Ambiente, Administración regional Panamá Metropolitana. Panamá.
- Ministerio de Ambiente. (2016). Gaceta Oficial. Resolución N° DM-0392-2016. https://www.gacetaoficial.gob.pa/pdfTemp/28077/GacetaNo_28077_20160719.pdf



- Pardow, A., Gehrig-Downie, C., Gradstein, R., & Lakatos, M. (2012). Functional diversity of epiphytes in two tropical lowland rainforests, French Guiana: Using bryophyte life-forms to detect areas of high biodiversity. *Biodivers. Conserv.* 21(14), 3637-3655. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/S10531-012-0386-Z/METRICS>
- Rodríguez-Quiel, E., Arrocha, C., & Salazar-Allen, N. (2010). Utilization of *Thuidium delicatulum* (Hedw.) Mitt. as bioindicator for environmental zinc, copper and lead contamination in Boquete, Province of Chiriquí, Panamá. *Trop. Bryol.* 32(1), 1-14. <https://doi.org/10.11646/bde.32.1.3>
- Rodríguez-Quiel, E., Kluge, J., Mendieta-Leiva, G., Bader, M. Y., Eyvar Rodríguez-Quiel, C. E., & Uch, H. (2022). Elevational patterns in tropical bryophyte diversity differ among substrates: A case study on Baru volcano, Panama. *J. Veg. Sci.* 33, 1-11. <https://doi.org/10.1111/jvs.13136>
- Rodríguez-Quiel, E., Mendieta-Leiva, G., & Bader, M. Y. (2019). Elevational patterns of bryophyte and lichen biomass differ among substrates in the tropical montane forest of Baru Volcano, Panama. *J. Bryol.* 41(2), 95-106. <https://doi.org/10.1080/03736687.2019.1584433>
- Salazar Allen, N., Arrocha, C., & Chung, C. (1991). The mosses of Barro Colorado Island, Panama. *The Bryologist*, 94(3), 289-293. <https://doi.org/10.2307/3243967>
- Salazar Allen, N., & Chung, C. (1997). Primera aproximación al catálogo de briófitas del Parque Nacional de Coiba (Panamá). Castroviejo S. & Velayos M. (Eds.), *Flora y fauna del Parque Nacional de Coiba (Panamá): inventario preliminar*. AECI Agencia Española de Cooperación Internacional.
- Salazar Allen, N., & Crosby, M. (1985). Distribución y Diversidad de la Flora de Musgos de Panamá. D'Arcy, W. C. y M. Correa (Eds.) *The Botany and natural history of Panama*. Missouri Bot. Gard. 10, 49-52.
- Salazar Allen, N., Dauphin, G., Villarreal, J. C., Caswell L-Levy, C., Cox, E., Espinoza, B. A., Gudiño, J., Hernández-Rodríguez, E., Magaña-Marcial, K. Y., MezÁka, A., Ramírez-Román, J. D., Rodríguez, L., Carvajal, A. R., Romero-Moreno, C., Tomitani, A., & Zeballos-Grijalva, K. (2022). Bryophytes of mangroves of Bocas del Toro, Panama. *Bry. Div. Evo.* 45(1), 133–150. <https://doi.org/10.11646/BDE.45.1.9>
- Souza, J. P. S., Gomes, P. W. P., Dos Santos, R., & Tavares-Martins, A. C. C. (2021). Bryophyte flora in an Amazon Island: structure of communities in areas of different



levels of anthropization. *Rodriguésia*, 72, 1–13. <https://doi.org/10.1590/2175-7860202172107>

Sporn, S. G., Bos, M. M., Kessler, M., & Gradstein, S. R. (2010). Vertical distribution of epiphytic bryophytes in an Indonesian rainforest. *Biodivers. Conserv.* 19, 745-760. <https://doi.org/10.1007/s10531-009-9731-2>

Takashima-Oliveira, T. T. G., De Medeiros, P. S., & Tavares-Martins, A. C. C. (2020). Bryophyte communities across the ecological succession process in the Caxiuanã National Forest, Pará, Brazil. *An. Acad. Bras. Cienc.* 92(1), e20180626. <https://doi.org/10.1590/0001-3765202020180626>

Vanderpoorten, A., & Goffinet, B. (2009). Mosses. In *Introduction to Bryophytes*. Cambridge: Cambridge University Press (pp. 70-105). <https://doi.org/10.1017/CBO9780511626838.005>





Razonamiento científico en estudiantes de primer ingreso: un estudio diagnóstico en la Universidad de Panamá

Scientific Reasoning in First-Year Students: A Diagnostic Study at the University of Panama

Adam's Martínez Soto

Universidad de Panamá, Grupo de Investigación en Astronomía, Astrofísica y Ciencias Espaciales, Panamá.

adams.martinez@up.ac.pa

<https://orcid.org/0000-0001-8060-686X>

Marciano Santamaría

Universidad de Panamá, Facultad de Ciencias Naturales, Exactas y Tecnología, Departamento de Física,

Panamá. marciano.santamaria@up.ac.pa

<https://orcid.org/0000-0002-7081-7273>

Luis Emiliani

Universidad de Panamá, Facultad de Ciencias Naturales, Exactas y Tecnología, Departamento de Física,

Panamá. luis-e.emiliani-d@up.ac.pa

<https://orcid.org/0000-0002-4876-1592>

Alcides Muñoz

Universidad de Panamá, Facultad de Ciencias Naturales, Exactas y Tecnología, Departamento de Física,

Panamá. alcides.munozl@up.ac.pa

<https://orcid.org/0009-0007-9108-675x>

Guillermo Burke

Universidad de Panamá, Facultad de Ciencias Naturales, Exactas y Tecnología, Departamento de Física,

Panamá. guillermo.burke-m@up.ac.pa

<https://orcid.org/0009-0001-4710-0071>

Ramiro Villarreal

Universidad de Panamá, Facultad de Ciencias Naturales, Exactas y Tecnología, Departamento de Física,

Panamá. ramiro.villarreal@up.ac.pa

<https://orcid.org/0009-0001-0887-6707>

Víctor Concepción

Universidad de Panamá, Facultad de Ciencias Naturales, Exactas y Tecnología, Departamento de Física,

Panamá. victor.concepcion-g@up.ac.pa

<https://orcid.org/0009-0007-0425-5309>

Eduardo Chung

Universidad de Panamá, Grupo de Investigación en Astronomía, Astrofísica y Ciencias Espaciales, Panamá.

eduardo.chungng@up.ac.pa

<https://orcid.org/0000-0003-2834-9450>

Fecha de recepción: 26 de febrero de 2026

Fecha de aceptación: 20 de mayo de 2026

DOI: <https://doi.org/10.48204/j.tecno.v8n2.a10904>



RESUMEN

El razonamiento científico constituye un requisito cognitivo central en las carreras científicas y tecnológicas, aunque rara vez se diagnostica de manera sistemática al ingreso universitario. El objetivo de este estudio fue caracterizar los niveles de razonamiento científico en estudiantes de primer ingreso a la Universidad de Panamá y analizar su relación con variables académicas y formativas relevantes. Se adoptó un diseño cuantitativo descriptivo y se aplicó la Prueba de Razonamiento Científico de Lawson (LCTSR) a una muestra de 219 estudiantes. Los resultados indican que solo el 17.4 % de los participantes alcanza el nivel de razonamiento formal, mientras que el 63.5 % se sitúa en el nivel transicional y el 19.2 % en el nivel concreto. Asimismo, se identificaron patrones diferenciados según la carrera universitaria, el tipo de bachillerato cursado y algunas variables sociodemográficas. Estos hallazgos evidencian posibles desajustes entre el perfil cognitivo de ingreso de los estudiantes y las demandas de razonamiento implícitas en las carreras STEM, lo que subraya la pertinencia de incorporar diagnósticos tempranos del razonamiento científico como base para el diseño de estrategias didácticas de acompañamiento y nivelación en la educación superior.

PALABRAS CLAVE

Razonamiento científico; estudiantes universitarios de primer ingreso; brechas cognitivas; prueba de Lawson; educación superior.

ABSTRACT

Scientific reasoning constitutes a central cognitive requirement in scientific and technological degree programs, yet it is rarely assessed systematically at university entry. The aim of this study was to characterize the levels of scientific reasoning among first-year students at the University of Panama and to analyze their relationship with relevant academic and educational variables. A quantitative descriptive design was employed, and the Lawson Classroom Test of Scientific Reasoning (LCTSR) was administered to a sample of 219 students. The results indicate that only 17.4% of participants reached the formal reasoning level, whereas 63.5% were classified at the transitional level and 19.2% at the concrete level. In addition, differentiated patterns were identified according to academic major, type of high school diploma, and selected sociodemographic variables. These findings reveal possible mismatches between students' cognitive entry profiles and the reasoning demands implicit in STEM degree programs, underscoring the importance of incorporating early diagnostic assessments of scientific reasoning as a basis for designing instructional support and academic leveling strategies in higher education.

KEYWORDS

Scientific reasoning; first-year university students; cognitive gaps; Lawson test; higher education.

INTRODUCCIÓN

Las carreras científicas y tecnológicas suelen asumir que los estudiantes que ingresan a la universidad dominan formas básicas de razonamiento científico necesarias para comprender modelos, formular explicaciones y evaluar evidencias. No obstante, la investigación en didáctica de las ciencias ha mostrado que este supuesto curricular frecuentemente no coincide con las condiciones reales de ingreso.



En física e ingeniería, estas exigencias cognitivas incluyen la coordinación de representaciones matemáticas, el análisis de relaciones multivariantes y la construcción de modelos explicativos sobre fenómenos no observables directamente. Investigaciones en Educación en Física (Physics Education Research, PER) muestran que estudiantes con buen desempeño académico previo pueden presentar limitaciones importantes en razonamiento proporcional, control de variables y pensamiento hipotético-deductivo, afectando especialmente el aprendizaje de la mecánica newtoniana, la modelización científica y el formalismo vectorial en cursos iniciales universitarios (Bao et al., 2009; Fabby & Koenig, 2015; Shaffer & McDermott, 2005).

El razonamiento científico no emerge automáticamente mediante la exposición a contenidos disciplinares. Su desarrollo requiere intervenciones didácticas explícitas orientadas a la indagación, la argumentación y la modelización. La evidencia meta-analítica reporta efectos consistentes de estas estrategias sobre habilidades de razonamiento y comprensión conceptual en distintos niveles educativos (Engelmann et al., 2016; Malone & Schuchardt, 2023), reforzando su papel como componente central en la transición entre educación media y educación superior.

La Prueba de Razonamiento Científico de Lawson (Lawson Classroom Test of Scientific Reasoning, LCTSR) se utiliza ampliamente para caracterizar el nivel inicial de razonamiento científico y analizar su relación con el desempeño académico en disciplinas STEM. Investigaciones previas reportan asociaciones consistentes entre los puntajes del LCTSR y tareas que requieren razonamiento conceptual y transferencia a situaciones nuevas (Fabby & Koenig, 2015; Hrouzková & Richterek, 2021; Moore & Rubbo, 2012). Aunque el instrumento no evalúa la totalidad de las prácticas epistémicas implicadas en la actividad científica, continúa siendo una herramienta útil para el diagnóstico inicial del perfil cognitivo de ingreso (Bao et al., 2022; Kalinowski & Willoughby, 2019).

Los estudios sistemáticos sobre razonamiento científico y demandas cognitivas en estudiantes universitarios continúan siendo escasos en Panamá. Sin embargo, desde la década de 1980 se desarrollaron en la Universidad de Panamá investigaciones pioneras orientadas a analizar la relación entre pensamiento formal, rendimiento académico y enseñanza de la física universitaria (Ruiz et al., 1982; Samudio & Maturell, 1992).

Particularmente, Samudio & Maturell (1992) reportaron que una proporción importante de los contenidos del curso Física General requería operaciones formales, mientras que solo una minoría de los estudiantes evidenciaba niveles de pensamiento compatibles con dichas exigencias cognitivas. De manera complementaria, Sáenz et al. (2003) analizaron el impacto de estrategias educativas orientadas al fortalecimiento de estructuras de pensamiento en estudiantes de nivel medio superior, evidenciando interés temprano en el contexto panameño por el desarrollo cognitivo asociado al aprendizaje científico. Otros trabajos nacionales también exploraron la influencia de las trayectorias educativas previas y de las estrategias metodológicas sobre el desempeño en cursos universitarios de física (Moreno et al., 1992; Moreno & Donaldson, 1992; Pino & Medina, 1992).



A pesar de estos antecedentes, no se dispone de caracterizaciones recientes que permitan analizar cómo se manifiestan actualmente los niveles de razonamiento científico en estudiantes de primer ingreso y su relación con las demandas cognitivas de las carreras STEM contemporáneas.

El presente estudio tiene como propósito caracterizar los niveles de razonamiento científico de estudiantes de primer ingreso a la Universidad de Panamá mediante la aplicación de la Prueba de Razonamiento Científico de Lawson (LCTSR). Adicionalmente, examina su distribución según variables académicas y formativas relevantes, con el fin de identificar posibles desajustes entre el perfil cognitivo de ingreso de los estudiantes y las exigencias de razonamiento implícitas en las carreras STEM. De esta manera, el estudio busca aportar evidencia diagnóstica contextualizada que contribuya tanto a la toma de decisiones didácticas como al diseño de estrategias de acompañamiento académico durante la transición hacia la educación superior científica y tecnológica.

MATERIALES Y METODOS

El presente estudio tuvo como objetivo caracterizar el razonamiento científico de estudiantes de primer ingreso a la Universidad de Panamá y analizar su relación con variables académicas y sociodemográficas relevantes para la transición hacia la educación superior. Se adoptó un enfoque cuantitativo de alcance descriptivo-exploratorio y la investigación se desarrolló durante el primer semestre de 2024.

La muestra estuvo conformada por 219 estudiantes de primer ingreso matriculados en distintas carreras científicas y tecnológicas de la Universidad de Panamá. La participación fue voluntaria y los datos se analizaron de manera agregada con fines exclusivamente académicos.

Para la recolección de datos se empleó la Lawson Classroom Test of Scientific Reasoning (LCTSR), instrumento ampliamente utilizado en investigación en educación STEM para evaluar habilidades asociadas al razonamiento científico. El LCTSR está compuesto por 24 ítems de opción múltiple organizados en seis dimensiones: conservación de masa, proporcionalidad, control de variables, probabilidad, correlación y razonamiento hipotético-deductivo (Lawson, 2004; Sapia et al., 2022; Shofiyah et al., 2023). El puntaje total permite clasificar a los estudiantes en niveles de razonamiento concreto, transicional y formal.

El análisis de datos se realizó mediante estadística descriptiva, utilizando distribuciones porcentuales y comparaciones entre variables académicas y sociodemográficas. Adicionalmente, se exploró el comportamiento global de los puntajes mediante distintos modelos probabilísticos de ajuste (normal, gamma, log-normal, binomial, beta-binomial y Poisson). La comparación entre modelos se efectuó utilizando los criterios de información de Akaike (AIC), bayesiano (BIC) y la prueba de Kolmogorov-Smirnov (KS). Entre los



modelos evaluados, la distribución log-normal presentó el mejor ajuste comparativo (Tabla 1), por lo que se utilizó como referencia descriptiva para representar la distribución de los puntajes obtenidos en la cohorte analizada.

Tabla 1

Comparación de ajustes de distribución para los puntajes en la LCTSR.

Distribución	KS-p	AIC	BIC	Parámetros estimados
Log-normal	0.0485	1141.29	1151.46	(0.44, -0.36, 7.38)
Gamma	0.0480	1141.66	1151.83	(2.96, 1.42, 2.12)
Beta-Binomial	*	1181.34	1188.12	(4.64, 9.70)
Poisson	*	1193.19	1196.58	(7.71)
Normal	0.0001	1201.93	1208.71	(7.71, 3.73)
Binomial	*	1325.27	1328.65	(24, 0.32)

Nota: *No aplica para este modelo

RESULTADOS

Perfil general de la muestra

La muestra estuvo conformada por 219 estudiantes de primer ingreso provenientes de distintas regiones del país. Predominó la provincia de Panamá (48.4%), seguida de Coclé (19.2%), Panamá Oeste (18.3%) y Colón (7.8%). Las demás provincias representaron menos del 3% de la muestra.

La distribución por género fue relativamente equilibrada, con una ligera mayoría de hombres (53.9%). La mayor parte de los participantes egresó de colegios oficiales (76.7%) y culminó la educación media entre 2022 y 2023 (63.0%). La caracterización sociodemográfica completa se presenta en la Tabla 2.

Tabla 2

Caracterización sociodemográfica de la muestra (N = 219)

Variable	Categoría	N	%
Provincia	Panamá	106	48.4
	Coclé	42	19.2
	Panamá Oeste	40	18.3
	Colón	17	7.8
	Otras provincias / extranjero	14	6.3
Género	Hombre	118	53.9
	Mujer	101	46.1
Tipo de colegio	Oficial	168	76.7
	Particular	51	23.3
Año de egreso	2022–2023	138	63.0
	≤2021	81	37.0



Distribución general del razonamiento científico

La distribución de niveles de razonamiento científico mostró un predominio del nivel transicional (63.5%), seguido del nivel concreto (19.2%) y del nivel formal (17.4%) (Tabla 3). En conjunto, más del 80% de los estudiantes ingresó a la universidad sin alcanzar niveles de razonamiento formal, lo que evidencia el predominio de perfiles cognitivos transicionales al inicio de la formación universitaria.

Tabla 3

Distribución general de niveles de razonamiento científico

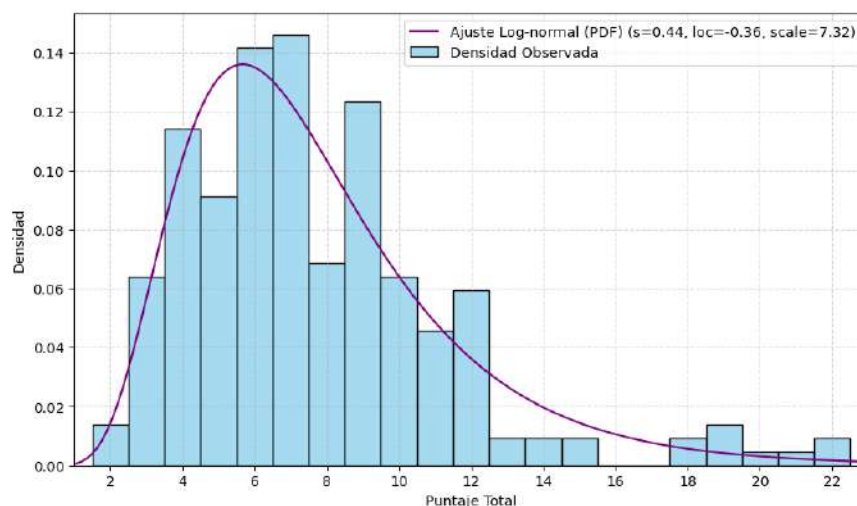
Nivel de razonamiento	% de estudiantes	Características cognitivas predominantes
Concreto	19.2	Basado en observaciones directas, dificultad con variables abstractas
Transicional	63.5	Capacidad parcial para controlar variables y generalizar conceptos
Formal	17.4	Aplicación de razonamiento hipotético-deductivo y modelización abstracta

Nota: Las características cognitivas se presentan como descriptores teóricos asociados a cada nivel según Lawson (2004).

La Figura 1 muestra la distribución de puntajes obtenidos en la LCTSR y su ajuste a una distribución log-normal. Se observa una concentración de valores en los rangos bajos e intermedios, con una disminución progresiva hacia los puntajes más altos, configurando una distribución asimétrica hacia la derecha.

Figura 1

Distribución de puntajes LCTSR y ajuste log-normal



Razonamiento científico y variables formativas



Tipo de bachillerato

La distribución de los niveles de razonamiento científico presentó diferencias entre los distintos tipos de bachillerato (Tabla 4). El bachillerato en Ciencias concentró estudiantes en los tres niveles de razonamiento, con predominio del nivel transicional (64.3%) y una proporción moderada en el nivel formal (19.9%).

En varios bachilleratos técnicos, la distribución se concentró predominantemente en los niveles concreto y transicional, con ausencia de estudiantes clasificados en nivel formal en algunas trayectorias formativas como Electricidad e Informática.

Carrera universitaria

La distribución de niveles de razonamiento científico también mostró variaciones entre carreras universitarias (Tabla 5). La Licenciatura en Física presentó la mayor proporción de estudiantes en nivel formal (50.0%), mientras que en la mayoría de las ingenierías predominó el nivel transicional, incluso en programas con alta carga matemática y de modelización. En Ingeniería en Operaciones Aeroportuarias y en Licenciatura en Ciencia y Tecnología de Alimentos no se registraron estudiantes clasificados en nivel formal.

Tabla 4

Distribución porcentual de niveles de razonamiento según tipo de bachillerato.

Bachiller	Concreto (%)	Transicional (%)	Formal (%)
Agropecuario	33.3	66.7	0.0
Ciencias	15.8	64.3	19.9
Comercio	9.1	81.8	9.1
Construcción	18.8	68.8	12.5
Electricidad	83.3	16.7	0.0
Industrial	0.0	100.0	0.0
Informática	66.7	33.3	0.0
Marítimo	50.0	50.0	0.0
Mecánica	50.0	50.0	0.0
Servicio y Gestión Institucional	50.0	50.0	0.0
Tecnología Informática	0.0	100.0	0.0
Electromecánica	0.0	0.0	100.0

Nota. Algunas categorías presentan tamaños muestrales reducidos; por ello, los porcentajes deben interpretarse únicamente con fines descriptivos.

Tabla 5

Distribución porcentual de niveles de razonamiento según carrera universitaria.

Carrera	Concreto (%)	Transicional (%)	Formal (%)
Ing. Hidrología y Recursos Hídricos	0.0	100.0	0.0
Ing. Industrial, Auditoría y Gestión de Procesos	23.3	62.8	14.0
Ing. en Edificaciones	12.5	68.8	18.8



Ing. en Energías Renovables	26.3	63.2	10.5
Ing. en Infraestructura	29.2	66.7	4.2
Ing. en Operaciones Aeroportuarias	11.1	88.9	0.0
Ing. en Prevención de Riesgos	30.4	47.8	21.7
Lic. Ciencia y Tecnología de Alimentos	21.7	78.3	0.0
Lic. en Física	5.6	44.4	50.0

Distribución del razonamiento científico según bachillerato y carrera

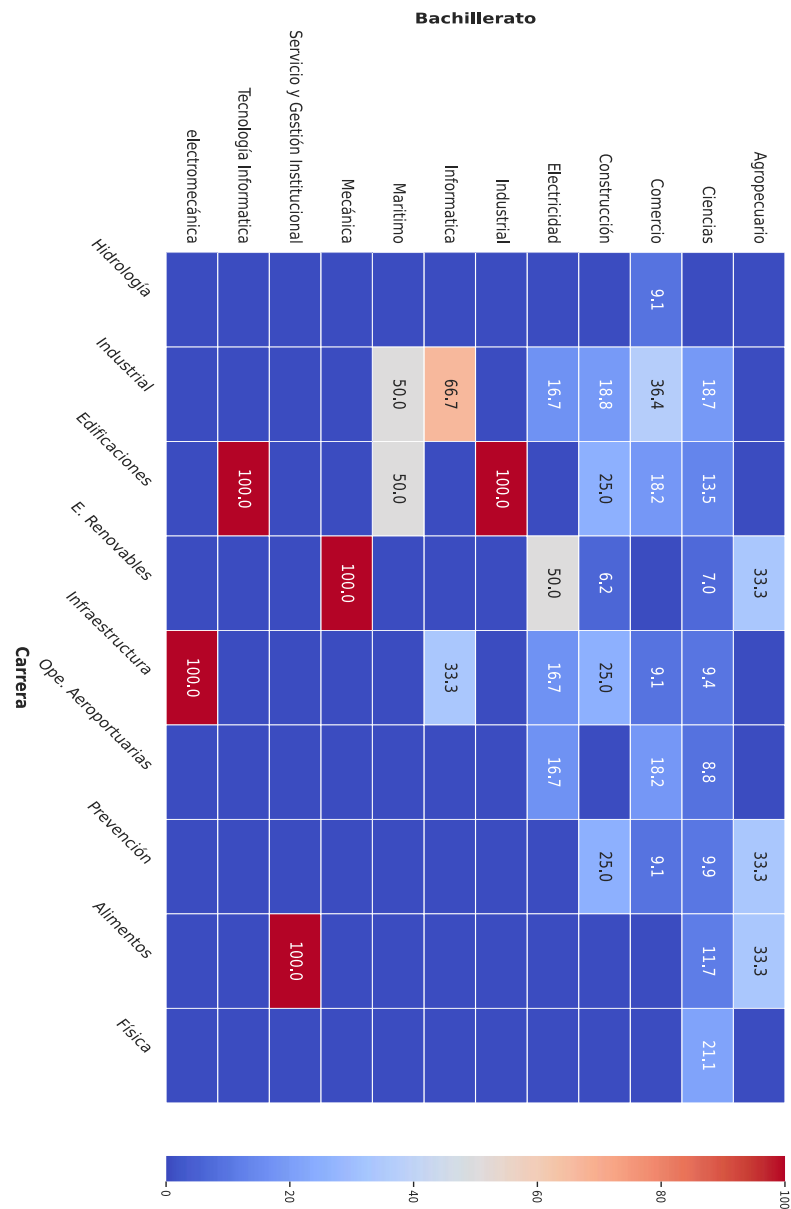
El análisis conjunto entre bachillerato y carrera permitió identificar patrones de distribución entre ambas variables (Figura 2). El bachillerato en Ciencias mostró mayor presencia relativa en carreras como Licenciatura en Física, Ingeniería Industrial, Ingeniería en Edificaciones e Ingeniería en Energías Renovables.

Por su parte, los bachilleratos técnicos presentaron una distribución más concentrada en determinadas trayectorias universitarias, evidenciando patrones diferenciados de ingreso según la formación previa.

Figura 2

Mapa de calor de correspondencia Bachillerato-Carrera.



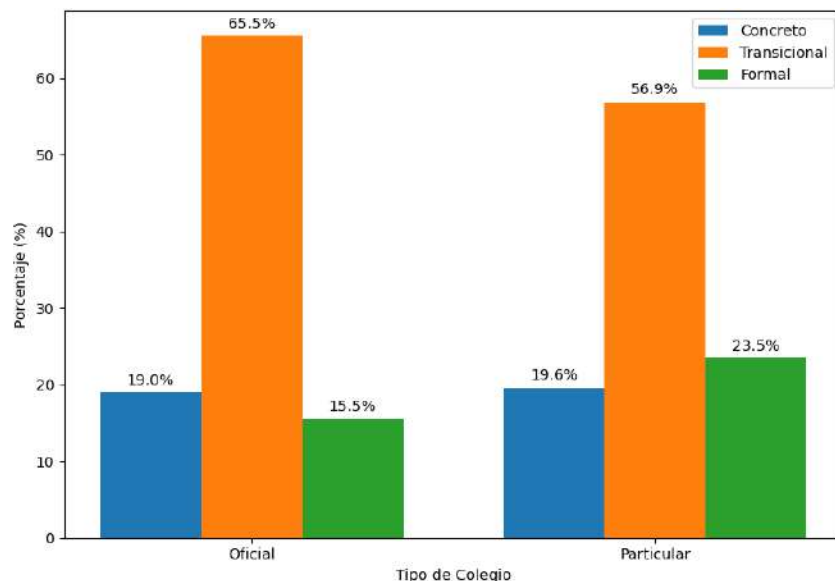


Distribución del razonamiento científico según variables contextuales

Según el tipo de institución de procedencia, los estudiantes egresados de colegios particulares presentaron una mayor proporción de razonamiento formal (23.5%) en comparación con los provenientes de colegios oficiales (15.5%). No obstante, en ambos grupos predominó el nivel transicional (Figura 3).

Figura 3

Distribución de niveles de razonamiento según tipo de colegio.

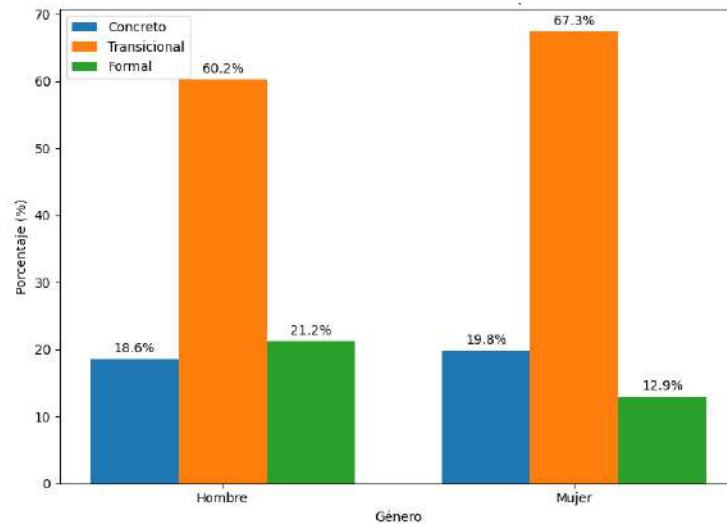


Por provincia, el nivel transicional fue mayoritario en todas las regiones analizadas. Las proporciones más altas se observaron en Veraguas (83.3%), Colón (70.6%) y Coclé (69.0%) (Tabla 6). Dado el tamaño reducido de la muestra en algunas provincias, estos resultados se interpretan exclusivamente en términos descriptivos, sin pretensiones inferenciales.

En el análisis por género, el razonamiento formal es más frecuente entre los hombres (21.2%) que entre las mujeres (12.9%), mientras que estas últimas se concentran en mayor proporción en el nivel transicional. Estas diferencias, aunque consistentes, no modifican el patrón global observado de predominio de niveles no formales al ingreso universitario (Figura 4).

Tabla 6
Distribución porcentual de niveles de razonamiento según provincia

Provincia	Concreto (%)	Transicional (%)	Formal (%)	% en la muestra
Chiriquí	0.0	100.0	0.0	0.5
Coclé	19.0	69.0	11.9	19.2
Colón	5.9	70.6	23.5	7.8
Darién	0.0	66.7	33.3	1.4
Herrera	33.3	33.3	33.3	1.4
Panamá	20.8	61.3	17.9	48.4
Panamá Oeste	20.0	60.0	20.0	18.3
Veraguas	16.7	83.3	0.0	5.5

Figura 4*Distribución de niveles de razonamiento según género*

DISCUSIÓN

Los resultados evidencian una predominancia de niveles de razonamiento científico transicional y concreto entre los estudiantes que ingresan a la universidad, mientras que el razonamiento formal se presenta en una proporción minoritaria. Este perfil sugiere una tensión entre las capacidades de razonamiento con las que los estudiantes inician su formación universitaria y las demandas cognitivas implícitas en las carreras científicas y tecnológicas. El patrón observado coincide con hallazgos reportados en distintos contextos internacionales, donde el acceso a programas STEM no garantiza el dominio de habilidades hipotético-deductivas necesarias para el aprendizaje científico universitario (Lawson, 1985; Renner, 1976; Sapia et al., 2022). Estudios clásicos en educación científica ya advertían que una proporción importante de estudiantes universitarios presenta limitaciones para enfrentar cursos introductorios altamente abstractos desde el punto de vista conceptual y formal (McKinnon & Renner, 1971; (Lawson & Renner, 1975; McKinnon & Renner, 1971).

En disciplinas como la física y la ingeniería, estas limitaciones adquieren especial relevancia debido al carácter abstracto, multivariable y altamente dependiente de procesos de modelización de los contenidos abordados en los cursos iniciales. El aprendizaje de la mecánica newtoniana, por ejemplo, requiere coordinar relaciones causales, interpretar sistemas dinámicos y articular simultáneamente representaciones matemáticas, gráficas y vectoriales. Desde la Investigación en Educación en Física (Physics Education Research, PER), diversos estudios han mostrado que estudiantes con bajos niveles de razonamiento científico pueden ejecutar procedimientos algorítmicos rutinarios, pero presentan dificultades para transferir conceptos a situaciones nuevas, establecer relaciones entre

variables y construir explicaciones coherentes de los fenómenos físicos; (Ates & Cataloglu, 2007; Bao et al., 2009; Fabby & Koenig, 2015).

Estas limitaciones también se manifiestan en el manejo del formalismo vectorial y de conceptos no directamente observables. Investigaciones previas indican que muchos estudiantes interpretan los vectores como expresiones algebraicas aisladas, en lugar de comprenderlos como magnitudes físicas con dirección y sentido, lo que restringe la comprensión conceptual de fenómenos cinemáticos y dinámicos (Heckler & Scaife, 2015; Shaffer & McDermott, 2005). En este contexto, la predominancia de niveles concretos y transicionales observada en la muestra sugiere posibles dificultades para enfrentar las demandas cognitivas presentes en asignaturas STEM de primer año, particularmente en aquellas con alta carga matemática, modelización y análisis multivariable.

Más que atribuir estas diferencias a déficits individuales, los resultados reflejan trayectorias educativas previas en las que el desarrollo explícito del razonamiento científico no ha constituido un objetivo sistemático de enseñanza. La persistencia de niveles no formales al ingreso universitario evidencia tensiones entre las prácticas de enseñanza predominantes en la educación media y las exigencias epistémicas propias de la formación científica universitaria. Desde enfoques contemporáneos sobre razonamiento científico, estas brechas se interpretan menos como etapas rígidas del desarrollo cognitivo y más como limitaciones en habilidades específicas relacionadas con el control de variables, el razonamiento proporcional y la modelización científica (Bao et al., 2022; Kalinowski & Willoughby, 2019).

El principal aporte de este estudio consiste en proporcionar una caracterización empírica reciente del razonamiento científico en estudiantes de primer ingreso en la Universidad de Panamá, un ámbito escasamente documentado en el contexto nacional desde los trabajos pioneros sobre pensamiento formal y demandas cognitivas en cursos universitarios de física (Ruiz et al., 1982; Sáenz et al., 2003; Samudio & Maturell, 1992). Más allá de su carácter descriptivo, los resultados permiten visibilizar brechas entre las capacidades de razonamiento científico con las que ingresan los estudiantes y las exigencias cognitivas presentes en carreras STEM, particularmente en contextos educativos donde este tipo de diagnósticos continúa siendo poco frecuente.

Los resultados respaldan la necesidad de incorporar estrategias de acompañamiento y nivelación que no se limiten al refuerzo de contenidos disciplinares, sino que integren actividades explícitas de modelización, argumentación, control de variables e indagación guiada. La evidencia reciente muestra que este tipo de intervenciones favorece el desarrollo progresivo del razonamiento científico y mejora la transferencia conceptual en contextos STEM (Alfieri et al., 2011; Engelmann et al., 2016; Malone & Schuchardt, 2023). En esta perspectiva, los hallazgos obtenidos constituyen una línea base relevante para futuras investigaciones orientadas a analizar la relación entre razonamiento científico, desempeño conceptual, permanencia académica y procesos de transición hacia la educación superior en estudiantes universitarios de carreras STEM en Panamá.



CONCLUSIONES

El presente estudio permitió caracterizar el perfil de razonamiento científico de estudiantes de primer ingreso a la Universidad de Panamá mediante la Prueba de Razonamiento Científico de Lawson (LCTSR). Los resultados evidencian un predominio de niveles de razonamiento concreto y transicional, mientras que solo una proporción reducida de estudiantes alcanza niveles de razonamiento formal al inicio de su formación universitaria. Este panorama sugiere la existencia de brechas entre las capacidades de razonamiento con las que ingresan los estudiantes y las demandas cognitivas implícitas en las carreras científicas y tecnológicas, particularmente en aquellas con alta carga conceptual, matemática y de modelización.

Desde la didáctica de las ciencias, estos hallazgos refuerzan la necesidad de considerar el razonamiento científico como un componente formativo explícito y no como una habilidad que se desarrolla automáticamente mediante la exposición a contenidos disciplinares. En este marco, la incorporación de diagnósticos tempranos puede aportar información relevante para el diseño de estrategias de acompañamiento y nivelación ajustadas a las demandas cognitivas de cada carrera. Del mismo modo, los resultados obtenidos constituyen una línea base para futuras investigaciones orientadas a evaluar el impacto de intervenciones didácticas centradas en modelización, indagación guiada y resolución conceptual de problemas en contextos universitarios STEM.



REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alfieri, L., Brooks, P. J., Aldrich, N. J., & Tenenbaum, H. R. (2011). Does Discovery-Based Instruction Enhance Learning? *Journal of Educational Psychology*, 103(1), 1–18. <https://doi.org/10.1037/A0021017>
- Ates, S., & Cataloglu, E. (2007). The effects of students' reasoning abilities on conceptual understandings and problem-solving skills in introductory mechanics. *European Journal of Physics*, 28(6), 1161. <https://doi.org/10.1088/0143-0807/28/6/013>
- Bao, L., Cai, T., Koenig, K., Fang, K., Han, J., Wang, J., Liu, Q., Ding, L., Cui, L., Luo, Y., Wang, Y., Li, E., & Wu, N. (2009). Physics. Learning and scientific reasoning. *Science (New York, N.Y.)*, 323(5914), 586–587. <https://doi.org/10.1126/SCIENCE.1167740>
- Bao, L., Koenig, K., Xiao, Y., Fritchman, J., Zhou, S., & Chen, C. (2022). Theoretical model and quantitative assessment of scientific thinking and reasoning. *Physical Review Physics Education Research*, 18(1). <https://doi.org/10.1103/PhysRevPhysEducRes.18.010115>
- Engelmann, K., Neuhaus, B. J., & Fischer, F. (2016). Fostering scientific reasoning in education—meta-analytic evidence from intervention studies. *Educational Research and Evaluation*, 22(5–6). <https://doi.org/10.1080/13803611.2016.1240089>
- Fabby, C., & Koenig, K. (2015). Examining the Relationship of Scientific Reasoning with Physics Problem Solving. *Journal of STEM Education: Innovations and Research*, 16(4). <https://jstem.org/jstem/index.php/JSTEM/article/view/1904>
- Heckler, A. F., & Scaife, T. M. (2015). Adding and Subtracting Vectors: The Problem with the Arrow Representation. *Physical Review Special Topics - Physics Education Research*, 11(1). <https://doi.org/10.1103/PHYSREVSTPER.11.010101>
- Hrouzková, T., & Richterek, L. (2021). *Lawson Classroom Test of Scientific Reasoning at Entrance University Level*. <https://doi.org/10.33225/balticste/2021.74>
- Kalinowski, S. T., & Willoughby, S. (2019). Development and validation of a scientific (formal) reasoning test for college students. *Journal of Research in Science Teaching*, 56(9), 1269–1284. <https://doi.org/10.1002/TEA.21555>
- Lawson, A. E. (1985). A Review of Research on Formal Reasoning and Science Teaching. *Journal of Research in Science Teaching*, 22(7), 569–617. <https://doi.org/10.1002/TEA.3660220702>



- Lawson, A. E., & Renner, J. W. (1975). Relationships of science subject matter and developmental levels of learners. *Journal of Research in Science Teaching*, 12(4), 347–358. <https://doi.org/10.1002/TEA.3660120405>
- Malone, K. L., & Schuchardt, A. (2023). Modelling-based pedagogy as a theme across science disciplines—Effects on scientific reasoning and content understanding. *European Journal of Science and Mathematics Education*, 11(4), 717–737. <https://doi.org/10.30935/SCIMATH/13516>
- McKinnon, J. W., & Renner, J. W. (1971). Are Colleges Concerned with Intellectual Development? *American Journal of Physics*, 39(9), 1047–1052. <https://doi.org/10.1119/1.1986367>
- Moore, J. C., & Rubbo, L. J. (2012). Scientific reasoning abilities of nonscience majors in physics-based courses. *Physical Review Special Topics - Physics Education Research*, 8(1). <https://doi.org/10.1103/PhysRevSTPER.8.010106>
- Moreno, V. E., & Donaldson, R. (1992). La resolución de problemas como una alternativa metodológica en la enseñanza de la física. *IX Congreso Científico Nacional*.
- Moreno, V. E., Rodríguez, I., Medina, E., Pino, A., Samudio, M., & Castillo, H. (1992). Nuevas estrategias metodológicas en la enseñanza de la física. *IX Congreso Científico Nacional*.
- Pino, A., & Medina, E. (1992). Rendimiento académico de estudiantes egresados de colegios particulares versus estudiantes egresados de colegios públicos en el curso de Física Aplicada. *IX Congreso Científico Nacional*.
- Renner, J. W. (1976). Significant physics content and intellectual development. *Physics Education*, 11(7), 458–462. <https://doi.org/10.1088/0031-9120/11/7/307>
- Ruiz, A., Barnett, D., Bethancourt, F., Fernández, B., Gordón, E., Grijalva, M., Guerra, S., Maturell, A., Moreno, V., Núñez, S., Rodríguez, I., Samudio, M., & Sánchez, G. (1982). Descripción preliminar de los esquemas básicos de pensamiento formal en estudiantes de primer año de las carreras de Ciencias Básicas en la Universidad de Panamá. *ConCiencia*, 1X(3), 1–5.
- Sáenz, E., Chung, E., & Moreno, J. E. (2003). Influencia de la Aplicación del PEACYT en las Estructuras de Pensamiento de los Estudiantes del Nivel Medio Superior. *Tecnociencia*, 5(2), 7–15. <https://doi.org/10.48204/NH>
- Samudio, M., & Maturell, Á. (1992). Análisis de los requerimientos cognoscitivos del curso de Física General 100a. *IX Congreso Científico Nacional*.



Sapia, P., Napoli, F., & Bozzo, G. (2022). The Lawson's Test for Scientific Reasoning as a Predictor for University Formative Success: A Prospective Study. *Education Sciences*, 12(11), 814–814. <https://doi.org/10.3390/EDUCSCI12110814>

Shaffer, P. S., & McDermott, L. C. (2005). A research-based approach to improving student understanding of the vector nature of kinematical concepts. *American Journal of Physics*, 73(10), 921–931. <https://doi.org/10.1119/1.2000976>

