



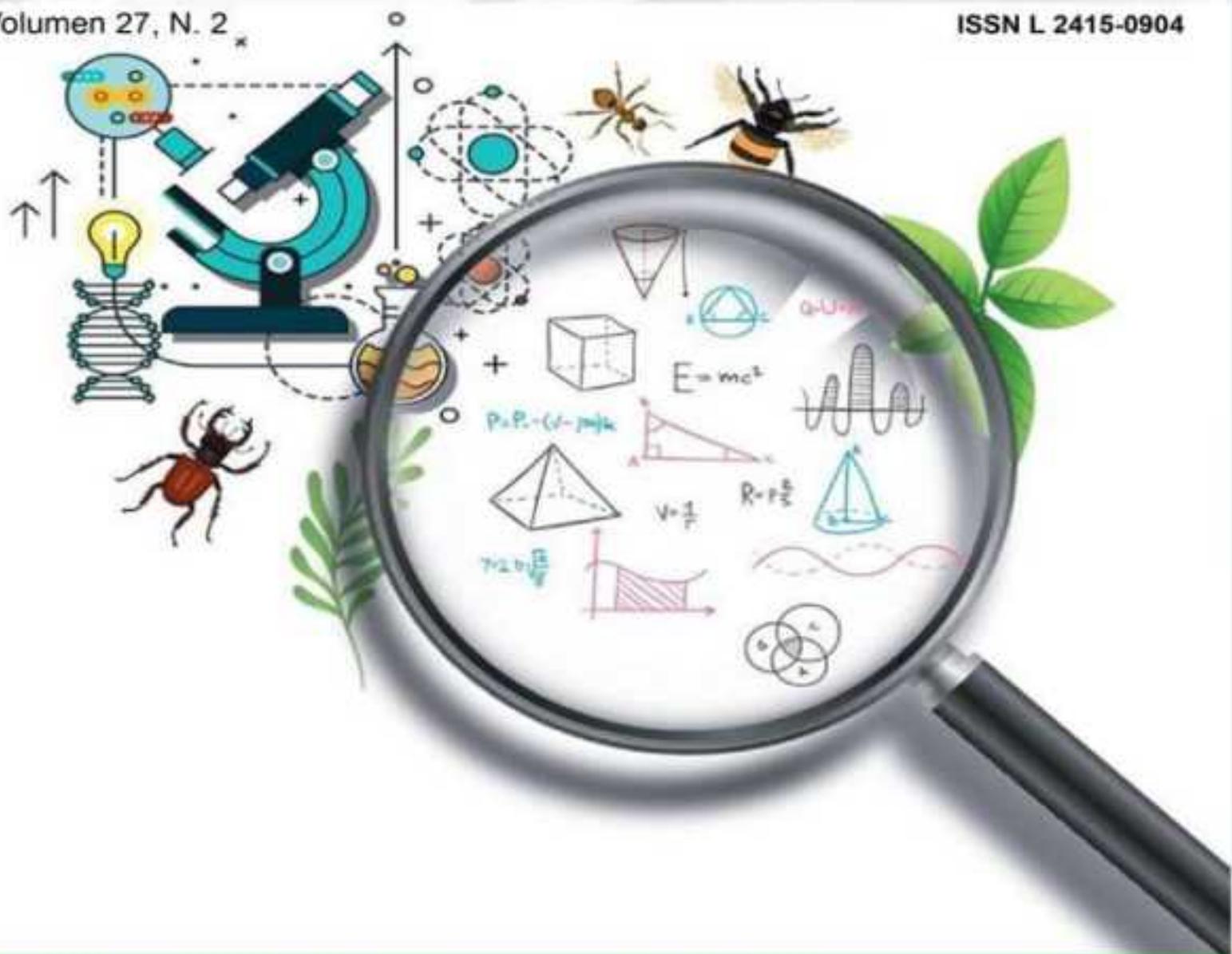
Biología-Química-Física
Matemática-Estadística



TECNOCIENCIA

Volumen 27, N. 2

ISSN L 2415-0904



Revista de la Facultad de Ciencias Naturales, Exactas y Tecnología
Universidad de Panamá
Julio - Diciembre 2025.

TECNOCIENCIA

Volumen 27, N. 2
Julio - Diciembre 2025

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. Janzel Villalaz

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

janzel.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 Cartografic I Geologic, Barcelona Cataluña, 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](mailto: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 Astigarrabía
Universidad de Panamá - Editor Jefe
Michelle Ferrín
Universidad de Panamá - Secretaria Técnica

EDITORIAL

Las Ciencias de la Tierra como pilar estratégico para el futuro de Panamá

Las Ciencias de la Tierra representan mucho más que una disciplina académica en un país tan biodiverso y geográficamente privilegiado como Panamá. Son una herramienta estratégica para el desarrollo sostenible, la gestión de los riesgos por amenazas naturales y la protección del patrimonio natural.

Panamá, al estar situada en una microplaca tectónica y contar con una compleja red hidrográfica y una gran diversidad geológica, es vulnerable a amenazas naturales como sismos, tsunamis, deslizamientos inundaciones y sequías. Por esto, el conocimiento científico sobre la Tierra se convierte en una necesidad urgente. La geología, la geofísica, la sismología, la vulcanología, la hidrología y otras ramas afines permiten comprender los procesos que moldean nuestro territorio y prever los riesgos que podrían afectar a las comunidades.

A través de las Ciencias de la Tierra, se pueden diseñar mejores políticas públicas de prevención y mitigación. Un buen ejemplo es la planificación urbana informada por estudios geotécnicos y de peligrosidad sísmica, lo cual puede salvar vidas y evitar pérdidas económicas considerables.

Así mismo, las Ciencias de la Tierra también juegan un papel esencial en la protección ambiental. La conservación de acuíferos, la gestión adecuada de los recursos minerales y energéticos, y la protección de los ecosistemas costeros y marinos, dependen del conocimiento profundo de los procesos terrestres. Sin esta base científica, sería imposible lograr un equilibrio entre desarrollo económico y sostenibilidad ecológica.

Panamá, como país de tránsito y con un canal interoceánico vital para el comercio mundial, como ha quedado en evidencia en el último año, tiene una responsabilidad particular en el manejo ambiental. Invertir en investigación, formación académica y aplicación tecnológica en las Ciencias de la Tierra no es un lujo, sino una inversión estratégica en resiliencia, sostenibilidad y soberanía de nuestro territorio.

Las Ciencias de la Tierra no solo explican el pasado geológico de Panamá, sino que ofrecen las claves para construir un futuro más seguro, justo y sostenible para todos.



Dr. Eduardo Camacho Astigarrabía

ÍNDICE

TÍTULO	PÁGINAS
Descripción del ensamblaje de Macroinvertebrados acuáticos, asociados a hojarasca y su relación con variables físicas, en quebrada Ancha (Colón), en el periodo 2018-2019.....	8-35
Cómo ha surgido el estudio de las emulsiones, y su paso a las Pickering de Nanocelulosa: Un análisis bibliométrico.....	36-54
Caracterización mediante Cromatografía de Gases acoplada a un detector de masas (GC-MS) de biodisel obtenido a partir de aceite reutilizado.....	55-74
Evaluación trienal de la actividad de anidación de la tortuga marina <i>Chelonia mydas</i> en Playa Lagarto, Los Santos, Panamá.....	75-99
Caracterización de periodos de suelos y estimación del efecto de sitio en el distrito de Arraiján, Provincia de Panamá Oeste, Panamá.....	100-118
Uso de grabadoras de sonido para documentar la diversidad biocultural de la Avifauna de las Tierras Altas Colectivas Emberá de Balsa, Darién, Panamá...	119-142
Diversidad de especies de hifomicetos acuáticos en espuma y hojarasca sumergida en áreas rurales y urbanizadas del río Caimito, Boquerón, Chiriquí, Panamá.....	143-160
Caracterización de periodos de suelo y estimación de efecto de sitio en el Casco Antiguo de la Ciudad de Panamá como apoyo a la preservación del patrimonio histórico de Panamá.....	161-175
Anatomía de la madera de <i>Dalbergia retusa</i> (Fabaceae: Papilionoideae) y dos muestras de maderas semejantes indeterminadas en Panamá.....	176-197



Descripción del ensamblaje de macroinvertebrados acuáticos, asociados a hojarasca y su relación con variables físicas, en Quebrada Ancha, provincia de Colón, Panamá, en el periodo 2018-2019

Description of aquatic macroinvertebrates assemblages, associated to leaf packs, and its relationship with physical variables, in Quebrada Ancha Colón, Panamá, during 2018-2019 period.

Yolanda Águila S

Universidad de Panamá, Facultad de Ciencias Naturales, Exactas y Tecnología, Panamá.
yolanda.aguila@up.ac.pa <https://orcid.org/0009-0002-8946-5906>

Jorge García

Universidad de Panamá, Facultad de Ciencias Naturales, Exactas y Tecnología, Panamá.
jgarcia1@yahoo.com <https://orcid.org/0009-0001-4283-0358>

Allison K. Burgos M

Universidad de Panamá, Facultad de Ciencias Naturales, Exactas y Tecnología, Panamá.
alis.krysbm@gmail.com <https://orcid.org/0009-0005-7827-9392>

Fecha de recepción: 26 de septiembre de 2024

Fecha de aceptación: 6 de marzo 2025

DOI: <https://doi.org/10.48204/j.tecno.v27n2.a7653>

RESUMEN

El estudio se realizó en Quebrada Ancha (Colón), de octubre de 2018 a junio de 2019, con el objetivo de: 1) describir el ensamblaje de macroinvertebrados asociados a hojarasca y 2) relacionar el ensamblaje con las variables físicas. En un tramo de 30 metros de longitud y durante 9 meses se estimaron variables físicas (temperatura, ancho, profundidad, velocidad, granulometría) y se colectaron tres muestras de hojarasca, por mes. La descarga fue mayor en la estación lluviosa. El perfil granulométrico mostró una disminución de la fracción de lodo en los meses secos. En **hojarasca** se colectaron 8310 individuos, con una riqueza de taxa de 44 y 60 considerando familia o género, respectivamente. Se determinaron 27 familias incluidas en 9 órdenes de Insecta, 7 taxa de Mollusca, 2 grupos de Collembola, Chelicerata, Crustacea, y uno de Turbellaria, Hirudinea, Oligochaeta y Myriapoda. Los taxa más abundantes, en orden decreciente, fueron Thiaridae (*Melanoides* sp.), Chironomidae, Hydrobiidae, Leptohiphidae (*Vacupernius*), Ancylidae, Hydropsychidae (*Smicridea*),

Turbellaria, Elmidae (*Microcylloephus*) y Leptophlebiidae (*Farrodes*). Se determinaron correlaciones positivas y significativas entre: a) descarga vs Riqueza, No.Ind, y No.Ind/g; b) arena gruesa vs No.Ind/g, peso de hojarasca y lodo; c) arena vs lodo.

PALABRAS CLAVE

Ensamblaje, macroinvertebrados, hojarasca, Panamá

ABSTRACT

We studied Quebrada Ancha (Colón) from October 2018 to June 2019, to describe leaf packs macroinvertebrates assemblages, and to relate physical and biological variables. We established a 30m long reach, and during nine (9) months we estimated physical variables (width, depth, velocity, flow, grain profile), and collected three handful leaf packs (g), per month. Flow was higher during the rainy season, and grain profile was variable, although silt particles decline during the dry season. We collected 8310 leaf packs macroinvertebrates, with richness of 44 or 60 taxa, depending on precision level, family or genus, respectively. We determine 27 families in 9 insects orders, 7 Mollusk taxa, 2 groups of Collembola, Chelicerata, Crustacea, and one group of Turbellaria, Hirudinea, Oligochaeta, and Myriapoda. The more abundant families were Thiaridae (*Melanoides* sp.), Chironomidae, Hydrobiidae, Leptohiphidae (*Vacupernius*), Ancylidae, Hydropsychidae (*Smicridea*), Turbellaria, Elmidae (*Microcylloephus*) y Leptophlebiidae (*Farrodes*), in decreasing order. Positive significant correlations were estimated for: a) Flow vs Richness, No.Ind. and No.Ind/g; b) Coarse sand vs No.Ind/g, leaf pack weight, and silt; c) fine sand vs silt.

KEYWORDS

Assemblages, macroinvertebrates, leaf packs, Panama.

INTRODUCCIÓN

Pearson et al. (2015) en su progresión general para los estudios en arroyos, mencionan: estudios descriptivos (población, comunidades), evaluación de teorías (hábitat, competencia, perturbación, dinámica trófica), impacto del hombre, desarrollo de métodos para monitorear la salud de los ecosistemas y planes de manejo. Su percepción que en los Trópicos esa progresión se presenta desfasada, es congruente con el desarrollo de estos estudios en Panamá (Aguila, 2014; Cornejo & Bernal, 2014).

En Panamá, el estudio de las acumulaciones de hojarasca ('leaf packs'), en corrientes de agua (arroyos, ríos), también ha presentado una 'progresión', con la mayoría de los estudios descriptivos. Éstos han sido a) puntuales, con cuatro sitios contrastantes y variación temporal (Aguila y García, 2011; Aguila y García, 2012; García, 2004; Pardo, 2002), o un solo sitio, con variación temporal (Burgos, 2020), b) extensivos con variación altitudinal-estacional [20 sitios: Río Indio, Miguel De La Borda, Coclé del Norte (Aguila, 2009)], extensivos con variación de intervención humana [15 sitios: CHCP (Helson y Williams, 2013)], c) semi

extensivos, un solo río, varios sitios, con gradiente longitudinal y variación temporal (Araúz et al., 2000; Higuera y Gómez, 2015), d) Un solo sitio, tres cuencas (Chagres, Boquerón, Trinidad) con variación temporal, de cobertura vegetal-uso de la tierra, geometría hidráulica, calidad del agua (Domínguez, 2018).

En los últimos quince años, se hacen más evidentes, en Panamá, los estudios o evaluaciones de procesos ecológicos como la fragmentación de las acumulaciones de hojarasca ('leaf packs') y su relación con macroinvertebrados fragmentadores o 'shredders' (Camacho et al., 2009) o con el posible impacto del cambio climático (Boyero et al., 2011), utilizando principalmente, unidades de colonización (bolsas con malla fina o gruesa).

En los estudios descriptivos, también se ha considerado, en mayor o menor grado, la relación entre los macroinvertebrados y algunas variables biofísicas como: geomorfología, temperatura, substrato, corriente, calidad del agua, bosque de galería, (Aguila & García, 2012), Domínguez, 2018; Higuera & Gómez, 2015), esperándose a futuro, una sistematización o protocolo para este tipo de estudios en hojarasca ('leaf pack'), en la escala del tramo.

Los objetivos de esta sección de la investigación permitieron estudiar el ensamblaje de macroinvertebrados acuáticos asociados a hojarasca, haciendo énfasis en: 1) describir el ensamblaje de macroinvertebrados acuáticos bentónicos [abundancia, abundancia relativa, composición porcentual de los taxa dominantes, 'densidad' (No.ind./g), diversidad α (Riqueza), Teoría de la Información (Shannon-Wiener), Asociaciones Potencialmente Indicadoras (API's) según Aguila & García (2011); 2) caracterizar físicamente la estación de muestreo (temperatura, ancho, profundidad, velocidad, descarga), 3) estimar características químicas selectas (NH₄, NO₃, PO₄, alcalinidad, dureza), así como 4) relacionar las variables abióticas con las bióticas.

AREA DE ESTUDIO

El estudio se realizó en Quebrada Ancha (Nuevo San Juan, Colón) aguas abajo del punto en que cruza la carretera Transistmica (Coordenadas: 09° 15' 18'' N - 79° 39' 40'' O) Figura 1a y Figura 1b. Ésta presenta un cauce relativamente angosto (3.20m – 7.60m) y de profundidad variable (0.09m – 0.80m), con fondo arenoso-fangoso en las zonas deposicionales, gravoso en las erosionales. No presenta llanura de inundación definida, el bosque de galería muy recuperado, sin dominancia de la paja canalera antes vista (Aguila & García, 2012), lo cual favorece un talud más protegido, más sombra y mayores aportes de materia orgánica particulada gruesa (MOPG: hojarasca). Nuestro sitio se encuentra, relativamente, cerca del sitio estudiado por el PMCC (1999) en el punto donde confluyen la Quebrada Ancha (Colón) y el Gatuncillo, área caracterizada en aquél entonces, por pastizales

(685ha), paja blanca (653ha), residencial (653ha), bosques + rastrojos + reforestación (623ha), lo cual demuestra que era un área muy impactada por el hombre.

Figura 1.

Ubicación del sitio de estudio, en la República de Panamá. 1a (arriba) ubicación regional; 1b (abajo) Ubicación del sitio de estudio en el Corredor Transistmico.



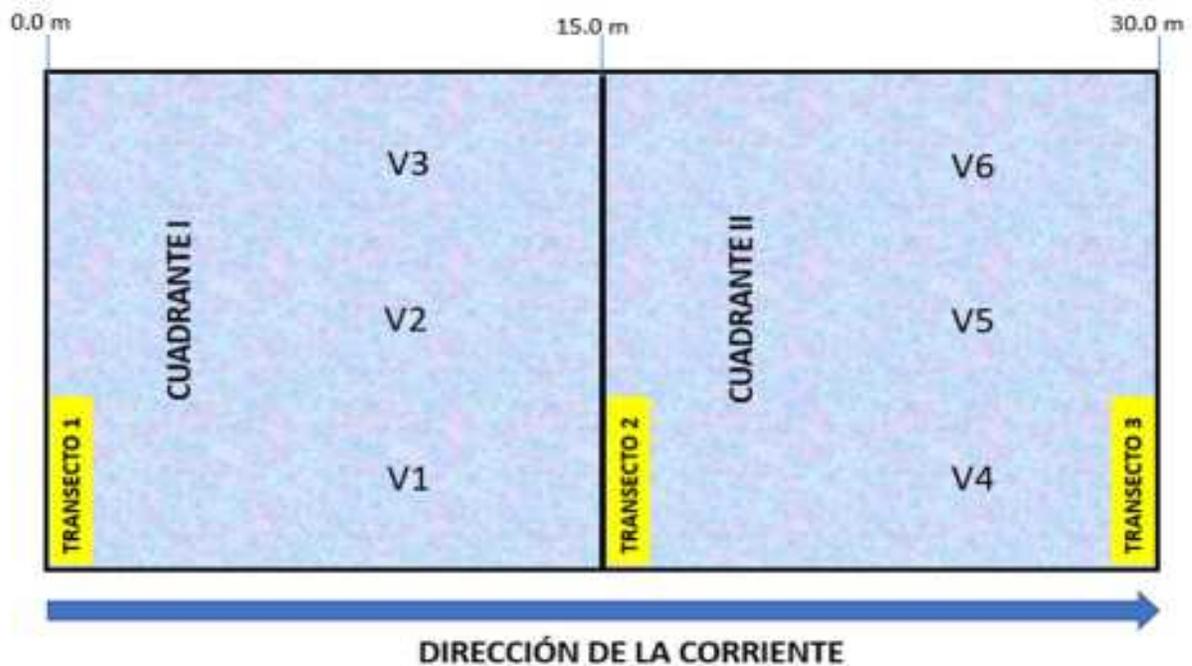
MATERIALES Y MÉTODOS

Caracterización física

Se delimitó una estación o tramo de 30m de longitud con ancho o espejo del agua (m) variable, dependiendo de la geomorfología del sitio, en el mismo lugar del estudio de 1999. En la misma se establecieron tres transectos (T1,T2,T3) marcados en los puntos 0m, 15m y 30m de la longitud de la estación, definiéndose así los cuadrantes I y II (Figura2). En cada transecto se midió, mensualmente, el ancho (m) del espejo del agua y la profundidad (m) a $\frac{1}{4}$, $\frac{1}{2}$ y $\frac{3}{4}$ de su longitud. En cada cuadrante (I, II), se estimó, mensualmente, la velocidad (m/s) tres veces (Cuadrante I : V1 = Izquierda, V2 = Centro, V3 = Derecha; Cuadrante II: V4 = Izquierda, V5 = Centro, V6 = Derecha), colocando dos ‘marcadores’ (A, B) a 2.0m de distancia y registrando, con un cronómetro, el tiempo (segundos) que demoró un cuerpo flotante en recorrer esa distancia. Posteriormente, se hicieron los cálculos finales (Velocidad = m/s).

Figura 2.

Esquema de los límites de la estación de estudio, transectos (1, 2, 3), cuadrantes (I,II) y ubicación de los puntos donde se determinó la velocidad (Cuadrante I : V1 = izquierda, V2 = centro, V3 = derecha; Cuadrante II : V4 = izquierda, V5 = centro, V6 = derecha).



Colecta de muestras

Como unidad de muestreo se utilizaron tres (3) paquetes o acumulaciones de hojarasca, por mes, durante nueve meses ($n = 27$ hojarasca). Cada muestra de hojarasca se trató de estandarizar llenando, aproximadamente, $\frac{3}{4}$ de una bolsa plástica, Blixi, de un galón (26.8 cm x 27.3 cm) con cierre hermético. Las muestras se fijaron en el campo con formaldehído al 5% y se llevaron al laboratorio ubicado en el edificio del Programa Centroamericano de Maestría en Entomología (planta baja, cubículo 107), de la Universidad de Panamá.

Procesamiento de muestras

Cada muestra de hojarasca fue lavada cuidadosamente con agua del grifo, para descartar las partículas finas, hasta que el agua se observó clara. Esto se hizo colocando la muestra en un tamíz de apertura de malla de 500um (U.S.A. Standard Test Sieve No.35) y sumergiéndolo parcialmente en una palangana con agua. Si las hojas estaban completas, se lavaban individualmente, pero siempre se colocaban sobre el tamíz para evitar la pérdida de los macroinvertebrados. Posteriormente, la muestra se colocó en una bandeja con fondo blanco para separar los macroinvertebrados del material vegetal, utilizando pinzas entomológicas finas y una lupa de cuello largo con aumento de 3 Dioptrias (Aguila & García, 2012). Luego de separar los organismos acuáticos, se procedió a su identificación a nivel de familia y/o género, utilizando un estereoscopio Leica con aumentos de 10X22 (ocular) y 2X (duplicador). La hojarasca, sin macroinvertebrados fue secada en un horno por 48 horas y luego pesada en una balanza digital (BIOBASE BE 6002-JEMA S.A.)

Identificación de los organismos (Taxonomía)

Los organismos fueron identificados al nivel de clase, familia o género dependiendo del grupo de organismos y las horas/hombre (Entomólogo) que se utilizaban para la determinación de cada grupo. Para la identificación de los insectos acuáticos se utilizó literatura selecta tal como Domínguez, Hubbard & Peters (1992); Domínguez & Fernández (2009); Flowers & De La Rosa (2010); Gutiérrez-Fonseca (2010); Merritt, Cummins & Berg (2008); Springer, Ramírez & Hanson (2010); Springer (2010), entre otras.

Caracterización química y microbiológica.

Se determinó nitrato (NO_3 mg/l), fosfato (PO_4 mg/l), alcalinidad (mg/l), dureza (mg/l), sólidos en suspensión (mg/l), y coliformes totales (NMP/100ml) y *E. coli* (NMP/100ml), sólo en época de transición estación seca- lluviosa de 2019. Estos análisis los realizó la compañía Water and Wastewater Treatment S.A., de acuerdo con los procedimientos establecidos por APHA (2017).

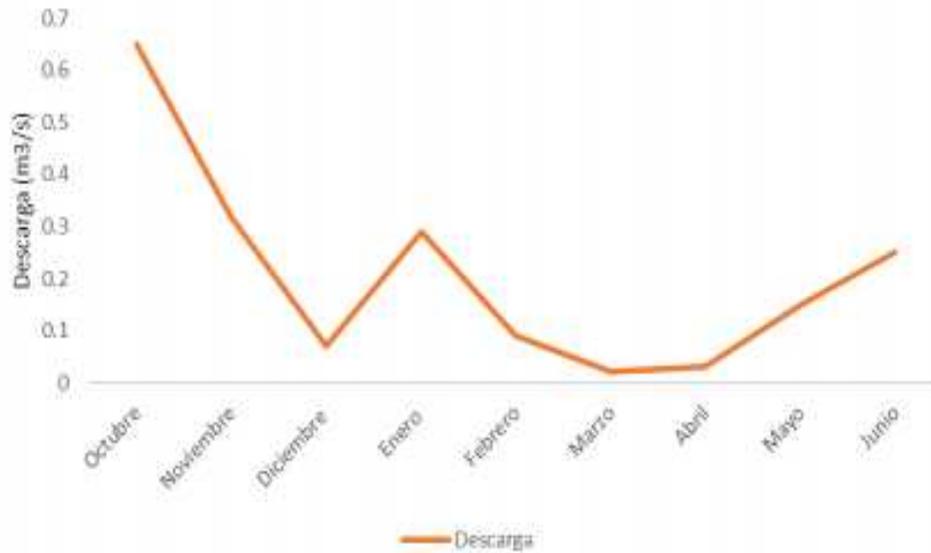
RESULTADOS

Caracterización física

Quebrada Ancha mantiene un canal muy particular que podría acercarse a un ‘tipo B’ (Brussock et al., 1985), aunque a diferente escala, donde se observan zonas de rápidos y pozas, pequeños, pero bien definidos, que cambiaron de condición, dependiendo de la época del año. El ancho mojado, medido como el espejo del agua, fluctuó en los tres transectos T1, T2, T3, de 3.20 a 5.50, de 4.00 a 7.60 y de 3.00 a 5.30, respectivamente. Con relación a la profundidad, esta varió, en los tres transectos T1, T2, y T3 de 0.29 a 0.48, de 0.36 a 0.51 y de 0.32 a 0.43, respectivamente (Aguila & García, 2021). Por otro lado, la velocidad, fluctuó en los Cuadrantes I y II de 0.02 a 0.40 y de 0.32 a 0.43, respectivamente. Al utilizar el promedio de las seis (6) velocidades, fue el mes de octubre el que registró la mayor Descarga promedio/transecto/mes (0.65), y marzo el mes que presentó la menor Descarga promedio/transectos/mes (0.02), Figura 3. Esta tendencia se refleja, parcialmente, en los transectos independientes (T1, T2, T3), toda vez que los tres presentan la mayor Descarga/mes en octubre (Figura 4).

Figura 3.

Descarga (m³/s) /mes (promedio V1-V6), en las colectas de Quebrada Ancha, en el periodo 2018-2019.



Al calcular la Descarga utilizando la velocidad promedio por cuadrante (I, II), octubre fue el mes de mayor descarga para los tres transectos, sin embargo, el Transecto 3 presentó la mayor descarga, de los tres transectos (Figura 5). Se logró determinar una correlación positiva ($R = 0.87877$) entre la descarga y el número de individuos colectados en la hojarasca (Aguila & García, 2021).

Figura 4.

Descarga (m³/s) /Transecto/mes (promedio V1-V6), en las colectas de Quebrada Ancha, en el periodo 2018-2019.

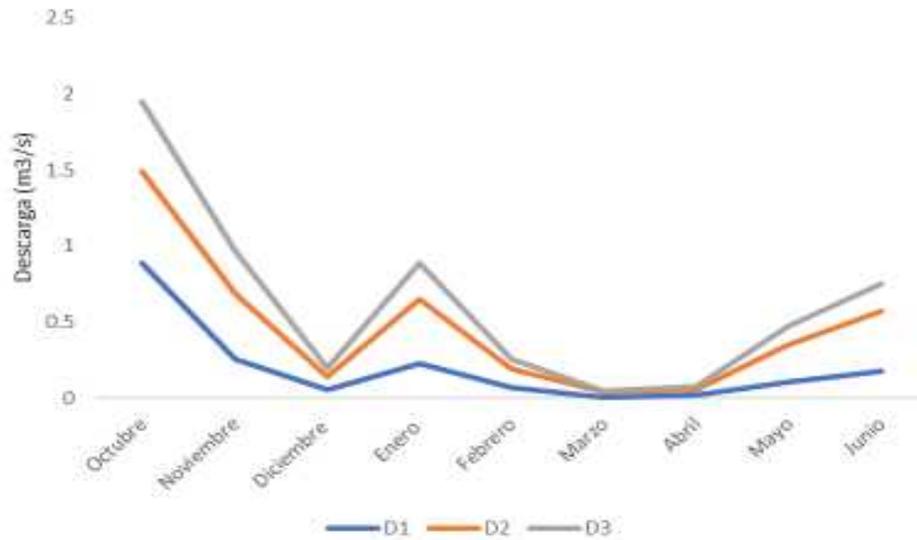
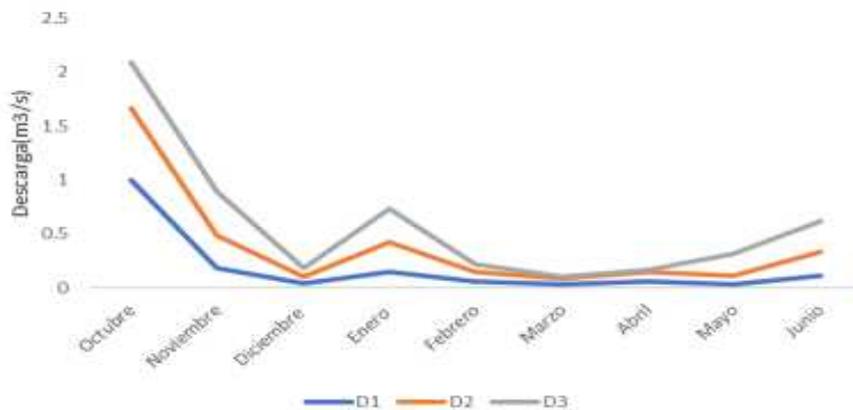


Figura 5.

Descarga (m³/s) / Transecto (D1 y D2 promedio V1-V3 (cuadrante I); D3 promedio V4- V6 (cuadrante II), en las colectas de Quebrada Ancha, en el periodo 2018-2019.



Con relación a la Granulometría, dominó la categoría de gránulo o guijarro (Tamíz No.8: apertura 2.4638 mm), seguida de grava fina (Tamíz ½”: apertura 12.5mm) y arena gruesa (Tamíz No.20: apertura 0.762mm), según Aguila y García (2021), determinándose una correlación positiva ($R = 0.79532$) entre Arena gruesa y lodo (Tamíz No.230: apertura 0.06096mm) y Arena fina y lodo ($R = 0.73229$). Además, se logró determinar una correlación positiva entre la arena gruesa y el peso (g) de la hojarasca ($R = 0.72031$), y el No.Ind./g ($R = 0.73672$). El perfil del tipo de sedimento, por muestra, por mes, fue relativamente irregular (Fig. 6), sólo el lodo presentó una tendencia a disminuir luego de la muestra número nueve, o sea en enero (Figura.7).

Figura 6.

Distribución (%) de los tipos de sedimento /muestra/mes, en las colectas de Quebrada Ancha, en el periodo 2018-2019.

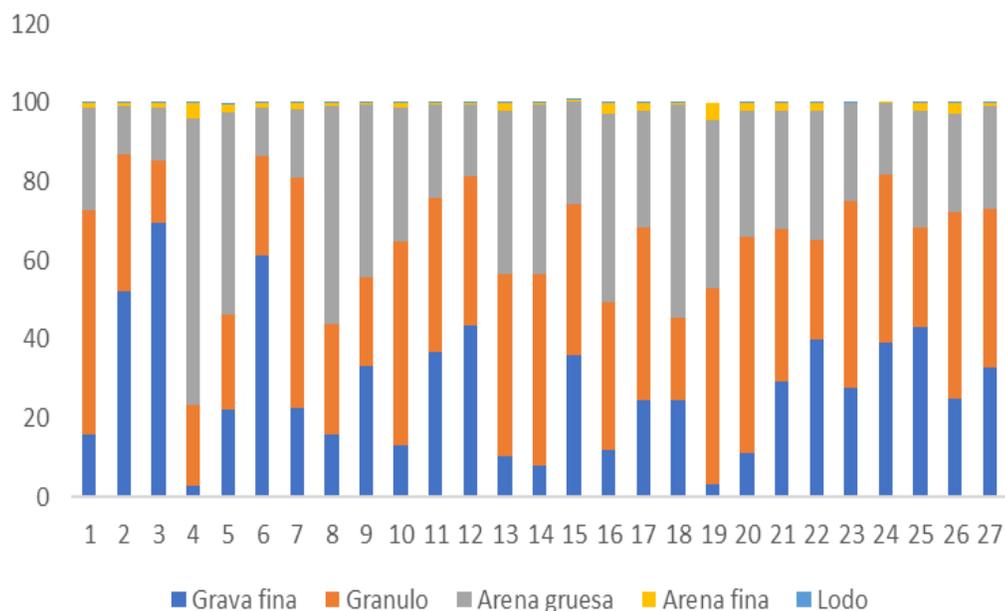
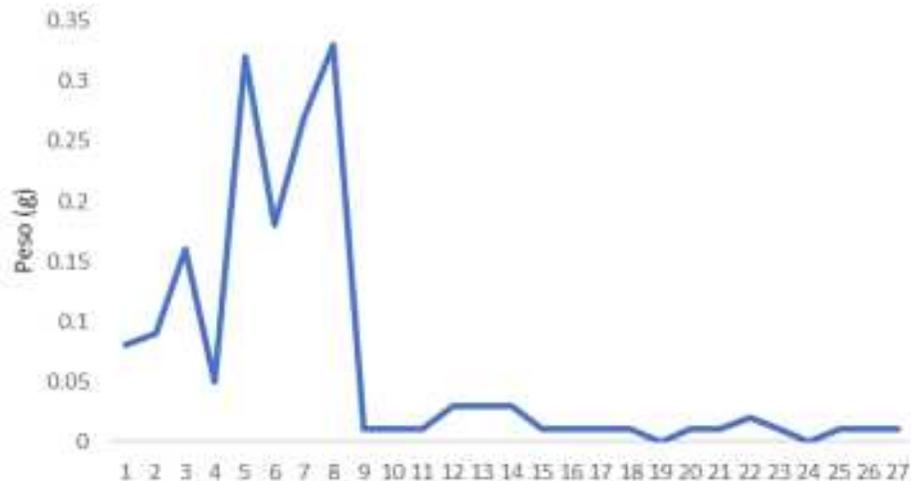


Figura 7.

Perfil de distribución del lodo (g/muestra), en las colectas de Quebrada Ancha, en el periodo 2018-2019



Descripción del ensamblaje en hojarasca

a) Número de individuos (No.Ind.), Número de taxa (No.Taxa; R= Riqueza), Dominancia (No.Ind.) por familia, Densidad Relativa (%)

En este estudio se colectó un total de 8310 individuos de macroinvertebrados, distribuidos en cuatro Phyla a saber: Arthropoda (Hexapoda, Crustacea, Myriapoda, Chelicerata), Mollusca (Gastropoda, Pelecypoda), Annelida (Oligochaeta, Hirudinea) y Platyhelminthes (Turbellaria). Mollusca y Hexapoda (Insecta) representaron el 47.7% y 44.9%, respectivamente, del total de individuos colectados (Aguila y García, 2021). Se determinaron 44 taxa (orden, clase, familia) incluidos 27 en la Clase Insecta, 7 en Mollusca, 2 en Crustacea, Chelicerata, Collembola, y sólo uno para Myriapoda, Turbellaria, Hirudinea y Oligochaeta, Catorce (14) de los 44 taxa representaron el 96% de los individuos, siendo Thiaridae (Mollusca, 27.94%), Chironomidae (Insecta, 17.7%), Hydrobiidae (Mollusca, 9.52%), Leptohyphidae y Ancyliidae las familias más representadas (Figura 8; Figura 9).

La Clase que presentó mayor riqueza fue Insecta (27), siendo el Orden Coleoptera el más diverso (7) y resaltando, en número, la familia Elmidae. Se estimó una diversidad general máxima de 2.478 (H').

Figura 8.

Número de individuo por taxa (clase, orden, familia) en orden decreciente, en las colectas de Quebrada Ancha, en el periodo 2018-2019.

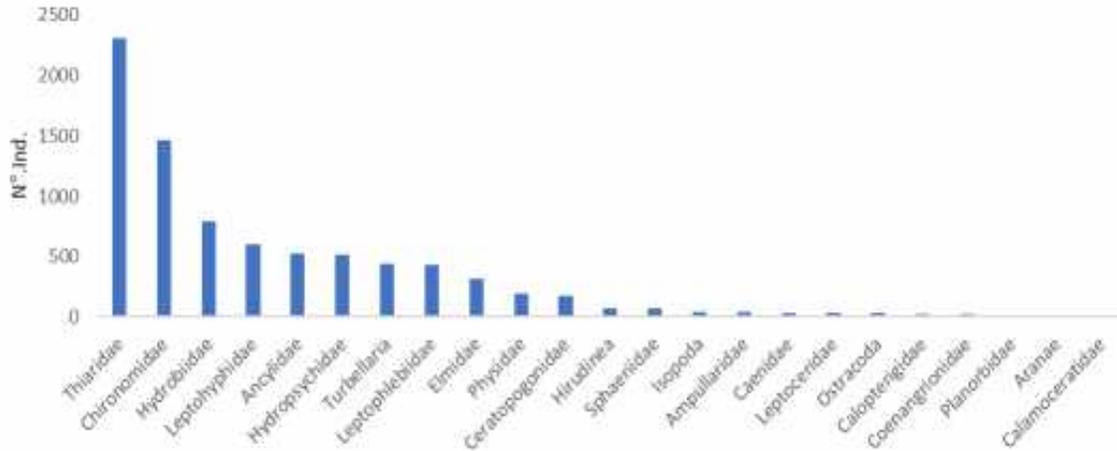
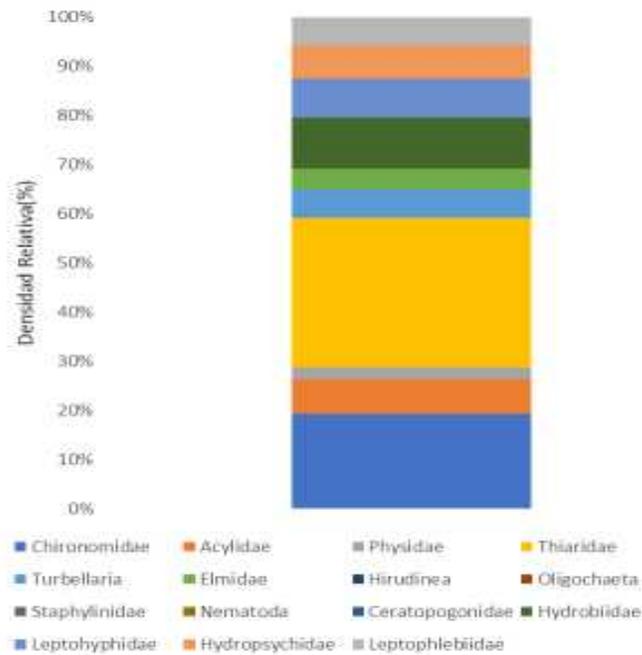


Figura 9.

Densidad Relativa (%) por taxa (clase, orden, familia), en las colectas de Quebrada Ancha, en el periodo 2018-2019.



b) Número de individuos (No.Ind.) o de taxa (No.Taxa, R), por mes.

La mayor abundancia de individuos/mes se estimó en el mes de junio, reflejando el incremento en las familias Hydrobiidae (788), Thiaridae (690) y Chironomidae (377), las cuales presentan una tendencia parecida (Fig.10a y 10b), a diferencia de los taxa Hydropsychidae, Leptohiphidae, Leptophlebiidae, Turbellaria y Physidae, los cuales van disminuyendo en número (Fig. 11a y 11b). La mayor riqueza (R) se estimó en enero (28). En este último se presentaron 9 taxa nuevos a saber: tres (3) familias de Heteroptera, cuatro (4) de Coleoptera y algunos grupos más terrestres como Myriapoda (1) y Collembola (1). La mayor diversidad (H') también se estimó en enero (2.478).

Figura 10.

Número de individuos, por taxa (clase, familia), por mes, en las colectas de Quebrada Ancha, en el periodo de 2018-2019. 10a (arriba) Thiaridae y Chironomidae; 10b (abajo) Hydrobiidae y Ancylidae.

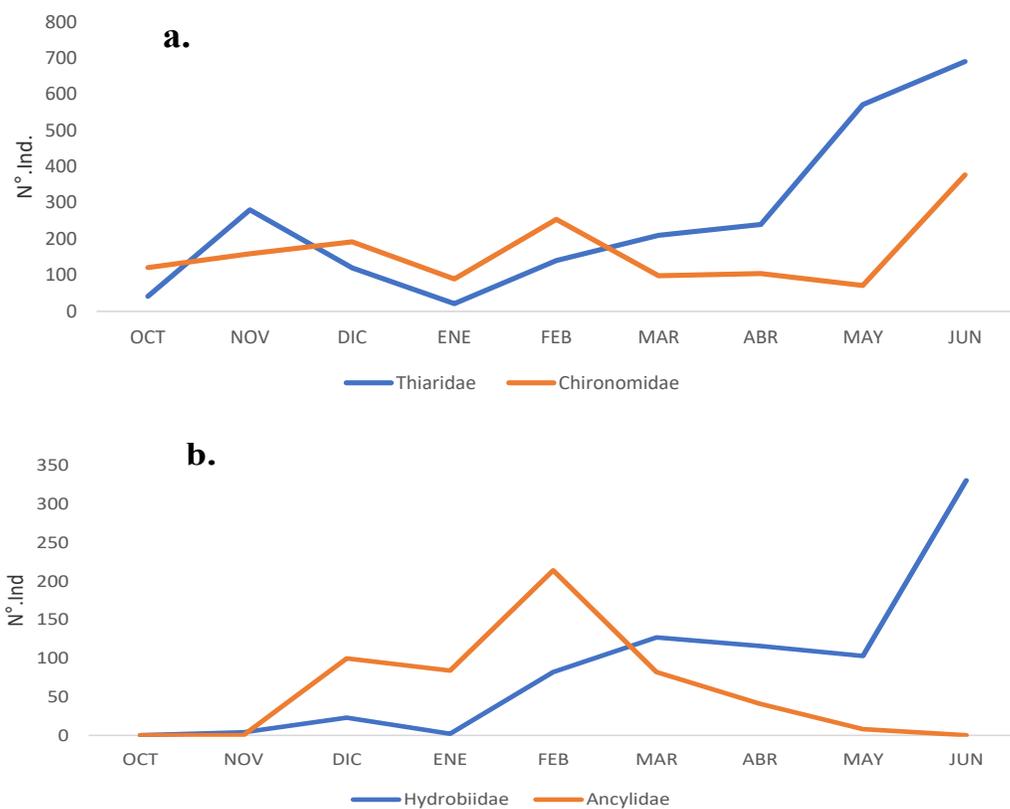
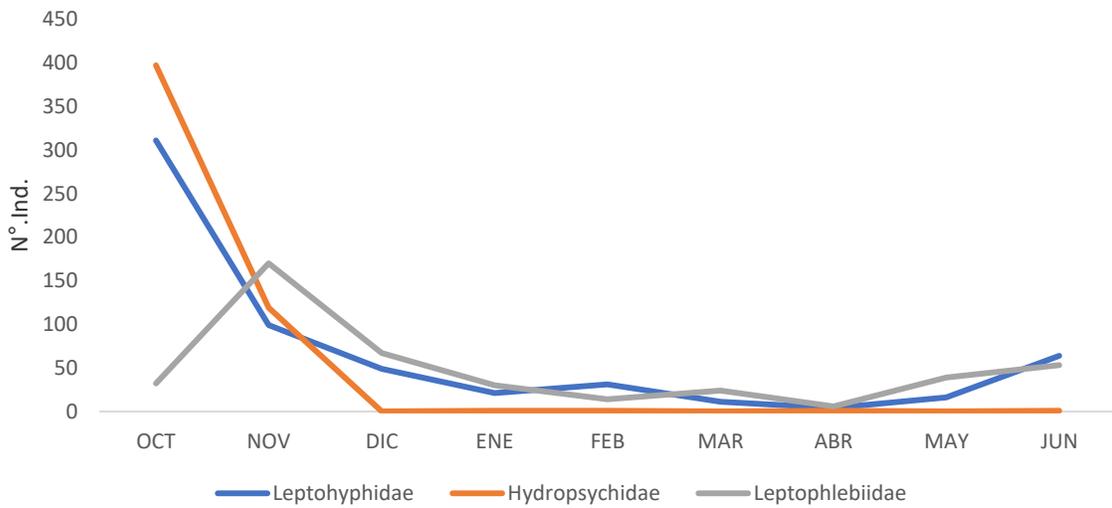
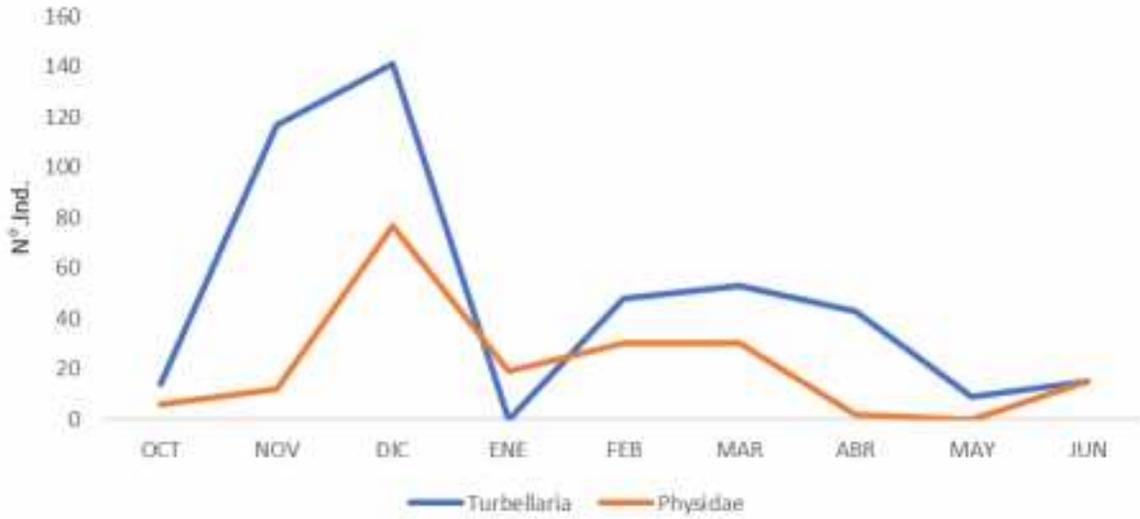


Figura 11.

Número de individuos, por taxa (clase, familia), por mes, en las colectas de Qbda. Ancha, en el periodo de 2018-2019. 11a (arriba) Turbellaria y Physidae; 11b (abajo) Hydropsychidae, Leptohiphidae, Leptophlebiidae.

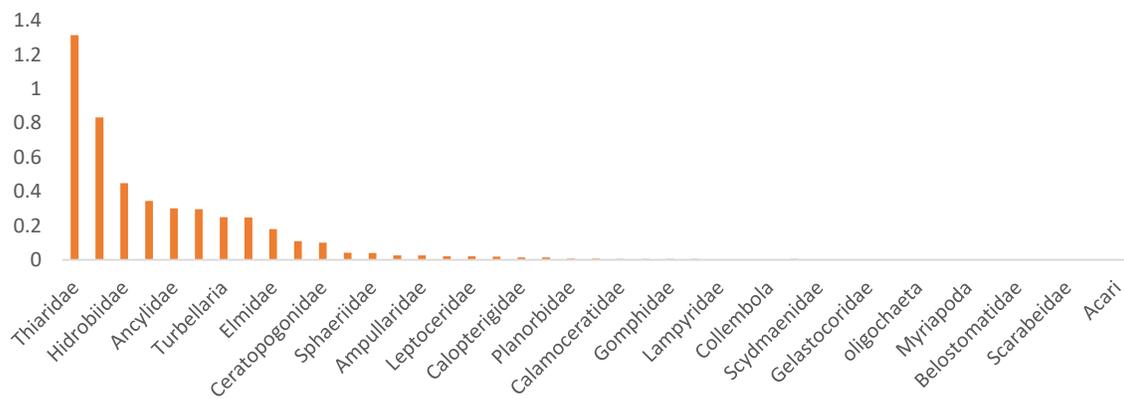


c) Número de individuos, por gramo (No.Ind./g), Número de taxa, por gramo (No.taxa/g), Dominancia (No.Ind./g), por familia.

En este estudio se colectó un total de 4.7 individuos por gramo, y 0.0244 taxa/gramo (Aguila y García, 2021). En cuanto a la dominancia de familias, con estos estimadores, se mantuvieron las familias Thiaridae, Chironomidae, Hydrobiidae, Leptohyphidae y Ancyliidae, como las más abundantes, evidenciándose nuevamente que no cambia, a este nivel, la tendencia de dominancia por familia, al utilizar el estimador No. individuos/g (Figura 12).

Figura 12.

Número de individuos, por gramo (N° Ind. /g), por familia, en orden decreciente, en las colectas de Qbda.Ancha, en el periodo de 2018-2019



d) Número de individuos por gramo, por mes (No.Ind./g/mes), Número de taxa por gramo, por mes (No.taxa/g/mes).

Con este estimador, se evidencian dos picos de mayor Número de individuos por gramo (No.Ind./g), uno en octubre + noviembre y otro en junio (Figura13a), coincidiendo en gran parte con lo observado al utilizar No.ind (Total) por mes (Figura13b).

El mayor Número de taxa/gramo se estimó en los meses de noviembre y enero (Figura14), a diferencia de los resultados al utilizar el número total de individuos (bruto) en donde se estimó que fue en diciembre y enero, cuando se presentaron más taxa. Con ambos estimadores se reitera la mayor riqueza en la colecta de enero, lo cual coincidió con el ‘represamiento’ de la quebrada, por parte de los vecinos del área.

Asociaciones Potencialmente Indicadoras (API's, según Aguila y García, 2011).

Al estimar la representatividad de las APIs, en el período 2018-2019, se observa que 'EPT' (Ephemeroptera, Plecoptera, Trichoptera) presenta mayor representatividad de octubre a noviembre, tendencia que va disminuyendo de diciembre a abril (Fig.15), en cambio MOL se va incrementando, evidenciándose una relación inversa entre ambas APIs ($p = -0.056$, PAST).

Figura 13.

13a (arriba). Número de individuos, por gramo (Nº. Ind. / g), por mes, y 13b (abajo) Número de individuos (total), por mes, en las colectas de Quebrada Ancha, en el periodo 2018-2019.



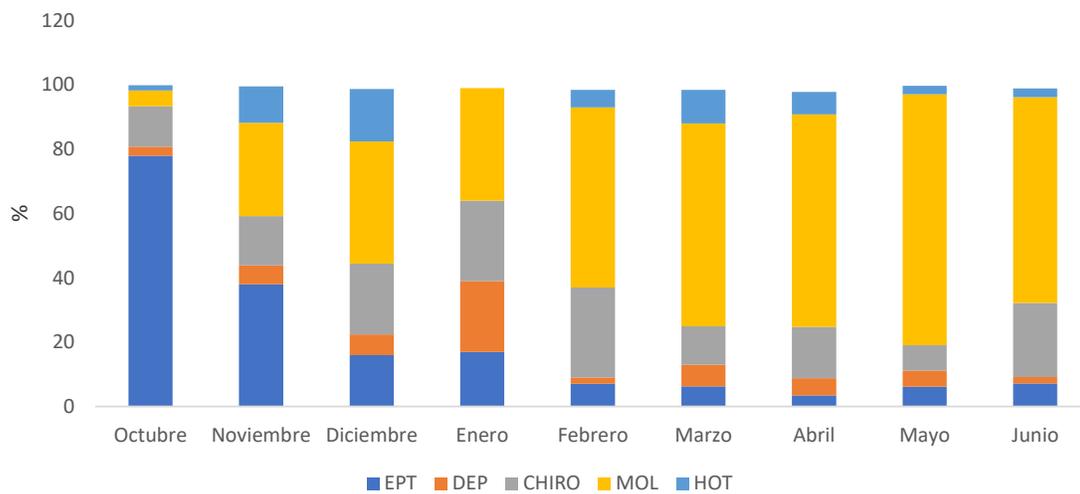
Figura 14.

Número de taxa, por gramo, por mes (N°. Taxa/g/mes), en las colectas de Quebrada Ancha, en el periodo 2018-2019.



Figura 15.

Asociaciones Potencialmente Indicadoras (APIs), por mes, en las colectas de Quebrada Ancha, en el periodo 2018-2019.



DISCUSIÓN

La importancia de los factores biofísicos, en la definición de patrones ecológicos y evolutivos, así como en las propiedades del ecosistema (biodiversidad, productividad, descomposición), ha sido detalladamente resaltada por Pearson et al., (2015), mencionando que los hábitats riberosos son definidos por la velocidad, tamaño de las partículas del sustrato, la secuencia de sequía e inundación, físico química del agua, régimen de luz, vegetación dentro y en la orilla, así como la variación estacional.

Descarga y geomorfología

El patrón estacional de la descarga (m^3/s) observado en Quebrada Ancha, en el período 2018-2019 es congruente con los datos de pluviosidad en el área (https://www.hidromet.com.pa/regimen_hidrologico; <https://micanaldepanama.com/nosotros/cuenca-hidrografica/anuario-hidrologico/>) que establecen la mayor precipitación en el mes de octubre. Por otro lado, el patrón estacional de la descarga por transecto (T1, T2, T3), que también se corresponde con el patrón de lluvias, podría estar influenciado por la geomorfología del sitio, toda vez que el tramo estudiado presenta una sección media más ancha y profunda y una posterior más angosta y llana, siendo en esta última donde se determinó la mayor descarga por transecto. Además, es conocido que la forma de una sección transversal de una quebrada depende de la interacción entre la descarga y el sedimento, la posibilidad de erosión del fondo y la orilla, la estabilidad que provee la vegetación ripariana y de otras estructuras (Alan & Castillo, 2007). Todo lo anterior puede determinar que la geomorfología del tramo en Quebrada Ancha, de forma irregular, se caracterice por una zona más ancha y profunda hacia los transectos T1 y T2 (poza), con las mayores profundidades registradas en la orilla izquierda de T1, y una zona más angosta en T3, donde se evidenciaron las menores profundidades y mayores velocidades (rápido). Todo lo anterior también promueve la acumulación de la hojarasca, en áreas de deposición y más ahora que se evidencia una recuperación del bosque de galería. Se confirma la importancia de la descarga como una característica fundamental en el ecosistema riberoso (Gore & Banning, 2017).

La separación de las partículas de diferente tamaño también se relaciona con la alternancia de zonas de pozas y rápidos en tramos de poca longitud (Allan & Castillo, 2007), así como se observa en Quebrada Ancha. A su vez, estas variables tienen influencia en la distribución de la biota riberosa, al alterar las condiciones físicas del área (redistribución de sustrato). Es ampliamente conocido que la biota responde a la alteración de la descarga (flujo) debido a la pérdida o alteración del hábitat, interrupción de los ciclos de vida - reclutamiento de juveniles, pérdida de la conectividad lateral y longitudinal, así como a la posibilidad de especies invasivas (Bunn & Arthington, 2002). Por otro lado, Hershey et al., (2010) también consideran que la variación en la descarga (flujo; inundación, sequía) es la principal causa de perturbación natural en arroyos o quebradas y además mencionan que es la razón por la cual

se presentan grandes reducciones temporales en la abundancia y diversidad de macroinvertebrados. En concordancia con lo explicado por estos autores, los resultados de nuestro estudio reflejan una relación directa y significativa (0.87) entre la descarga y el número de individuos asociados a hojarasca, pudiendo esto explicarse porque a mayor cantidad de hojarasca movilizada por el agua, y concentrada en el tramo, mayor hábitat disponible para su colonización. De acuerdo con las observaciones de campo y datos compilados, ya es evidente una distribución particular de los grupos (familia), por transecto, por descarga (D1, D2, D3), sin embargo, este análisis será realizado posteriormente, con más detalle a nivel taxonómico de género.

Quebrada Ancha ha presentado un patrón característico en cuanto a la descarga, lo que permite que el sitio estudiado presente condiciones fluctuantes, tanto de poza como de rápido, aunque no podemos considerarlas como extremas, si podemos esperar que características adaptativas estén permitiendo que el ensamblaje de macroinvertebrados presente también fluctuaciones propias para el sitio. Hershey et al., (2010) resaltan la capacidad adaptativa que poseen algunos grupos de insectos acuáticos para sobrellevar las condiciones cambiantes de su ambiente, mencionando que la zona hiporreica puede proveer refugio en condiciones extremas tanto de inundación, como de sequía. Además, mencionan que la recolonización de adultos que ponen huevos, así como la deriva de individuos, permite la reintroducción de grupos que pudiesen haber sido eliminados por eventos extremos (sequía, inundación, otros). En Panamá, sólo Higuera y Gómez (2015) ha explorado la relación entre los términos ancho (m), profundidad (m) y velocidad (m/s), que determinan la descarga (m³/s), con los insectos acuáticos colectados en la Quebrada Capisucia (Ciudad del Árbol, Chilibre), resaltando que sólo la variable profundidad resultó significativa en el modelo.

Granulometría

De acuerdo con Allan & Castillo (2007) la fuente y transporte de los sedimentos es importante pues determinan la dinámica del canal, afectan la calidad del hábitat para la biota, en donde mucho sedimento o muy poco puede ser perjudicial para la misma. Además, explican que el tipo de grano en el cauce de un tramo depende del aporte río arriba, de los tributarios locales, de las orillas y de la abrasión. Aunque, en este estudio, el método granulométrico fue ejecutado asumiendo la pérdida de partículas menores a 0.5mm (lavado en tamíz #35) se logró obtener un patrón muy dinámico en donde dominaron el gránulo o grava fina y arena gruesa, pero lo más relevante fue la correlación positiva entre la arena gruesa y la hojarasca (g) evidenciando un posible movimiento conjunto de ambos elementos. Por otro lado, el perfil de distribución del lodo, disminuyendo hacia los meses secos, puede ser el reflejo de menor arrastre debido a la menor escorrentía, normal en meses de estación seca.

Ensamblaje de macroinvertebrados

Número de individuos (total y por mes) y API's

No es de extrañar la abundancia y riqueza de macroinvertebrados colectados en las muestras de hojarasca, en este período, 2018-2019, si consideramos que la recuperación del bosque de galería puede haber mejorado la condición del hábitat. Hershey et al., (2010) denominan al sustrato orgánico hojarasca ('leaf pack') como 'sitios calientes' ('hotspots') para invertebrados toda vez que provee tanto sustrato como alimento. Estos autores también resaltan la importancia del sustrato y la hidrodinámica (velocidad de la corriente) como factores que determinan el tipo y abundancia de insectos acuáticos presentes, en la escala local del hábitat. Varios estudios (Holomuzki & Biggs, 2003; Jowett, 2003) consideran la relación entre los ensamblajes de macroinvertebrados bentónicos y la descarga, mencionándose que la corriente puede ser un poderoso elemento de perturbación debido a sus fluctuaciones episódicas y movilización del sedimento. Por otro lado, se menciona que algunos organismos (caracoles) la evitan refugiándose en pequeñas cuevas (concavidades), mientras que otros (tricópteros) utilizan sus líneas de seda para asegurarse áreas más protegidas (Holomuzki & Biggs, 2000). Es posible que los individuos de la familia Thiaridae (organismos detritívoros-fragmentador o depredador), grupo muy abundante en Quebrada Ancha, esté sacando ventaja de la sinuosidad de la quebrada que conjuntamente con grandes raíces promueven la acumulación de la hojarasca, en áreas más protegidas (T3), donde el paso del tiempo promueve su descomposición. La relación que encontramos entre la descarga y el número de individuos en la hojarasca (detrito orgánico), es un resultado reportado por otros autores quienes mencionan que la abundancia y riqueza de taxa de invertebrados se ha correlacionado con la cantidad de detritos, biomasa algal, complejidad y estabilidad del hábitat, profundidad y velocidad (Quinn & Hickey, 1994). Es importante resaltar que, en nuestro caso, cuando se enfatiza en el detrito orgánico mejor conocido como hojarasca, su descomposición y fragmentación van a depender de la lixiviación de compuestos solubles orgánicos o inorgánicos, colonización por hongos y bacterias ('condicionamiento'), fragmentación mecánica y la actividad de los animales que la fragmentan y la comen (Graca et al., 2001). El mejor 'condicionamiento' fue evidente cuando observamos grandes cantidades de Thiaridae (*Melanoides sp.*) acumulados, principalmente, en hojarasca, muy descompuesta (oscura) que a su vez fue colectada en sitios más protegidos cerca del transecto tres (T3).

Aunque el sitio de estudio en Quebrada Ancha está a nivel del mar, el tipo de bosque de galería recuperado, podría estar promoviendo mayor entrada de materia orgánica particulada gruesa (MOPG o 'CPOM', autóctona) que es la que comúnmente mencionan asociada con fragmentadores ('shredders'), en las cabeceras de arroyos de las zonas templadas (Vannote et al., 1980), sin embargo, habría que considerar la posibilidad que en este sitio otros grupos puedan ser considerados como fragmentadores como ocurrió en los estudios de Dobson (2004), cangrejos; Boyero et al., (2007, crayfish; Greathouse & Pringle

(2006), camarones y Yule et al., (2009), caracoles, cangrejos y moscas de mayo. La presencia de grupos como Hydrobiidae, Thiaridae, y Chironomidae, principalmente en los últimos cuatro meses del estudio (marzo, abril, mayo, junio) pudiese estar más vinculado al tipo de condicionamiento de la MOPG, debido a la posible presencia de abundantes microorganismos (hongos, bacterias), propios de estas microcuencas del Corredor Transistmico (PMCC, 2000), que inician la sucesión ecológica necesaria para el procesamiento del MOPG. Además, más nutrientes (PMCC, 2000, Aguila & García, 2011; datos este estudio) y mayores temperaturas en el agua (27°C, 28°C), durante la estación seca e inicio de la estación de transición seca-lluviosa, pudiesen también creado las condiciones óptimas para un condicionamiento más efectivo. Con relación a esto, Boyero et al., (2009) menciona que el rápido procesamiento de la hojarasca en los trópicos, donde se evidencia poca presencia de los fragmentadores típicos de la zona templada, es causada por una actividad microbiana intensa. Parte de lo anterior también es confirmado por Wantzen et al. (2008) cuando explican que la descomposición de la hojarasca depende de la interacción de factores físicos (descarga, temperatura), química del agua (nutrientes disueltos), agentes biológicos (microorganismos, detritívoros-invertebrados fragmentadores) y las características químicas de la hoja (dureza, compuestos fenólicos). Tank et al. (2010), también confirman lo anterior cuando menciona que en la descomposición de la materia orgánica también inciden factores como el tipo de materia orgánica y los macroinvertebrados. Para los trópicos se han realizado, en las últimas décadas, varios estudios sobre este proceso, en un contexto global, registrándose una gran variabilidad de resultados para algunos sitios (Boyero et al., 2011; Boyero et al., 2015).

La notoria abundancia de Ancyliidae (Pulmonata acuático) en diciembre, enero y febrero podría estar vinculada a una mayor incidencia de rayos de luz ('flexes') o de intensidad luminosa que pudo promover la proliferación de perifiton en alguna hojarasca, que, de acuerdo con nuestras observaciones, estaba menos condicionada (color amarillo) y entera. Esta posibilidad es apoyada por Aguila & García (2011); Cummins et al., (2019) y Merritt et al., (2017) quienes mencionan la diferencia entre los Thiaridae y Ancyliidae en cuanto a hábito alimenticio, resaltando que los Ancyliidae son raspadores alimentadores de periliton y perifiton.

Aunque todavía no se han determinado los Chironomidae a nivel de género, y reconocemos la gran plasticidad de este grupo, queremos resaltar que, en un estudio similar realizado en Quebrada Limón, Chilibre y Chilibrillo (Aguila y García, 2012; Pardo, 2002), se reportó la dominancia de *Polypedilum* un Chironomidae típico de aguas cálidas, clasificado también como fragmentador o 'shredder' (Ferrington & Berg, 2019). Por otro lado, la presencia de grupos como Hydropsychidae-*Smicridea* (octubre), Leptohiphidae-*Vacupernius* (octubre), Leptophlebiidae-*Farrodes* (noviembre) y Turbellaria (noviembre, diciembre), los tres primeros típicos colectores filtradores, en los meses de la estación lluviosa, pudiese estar

vinculada con una mayor disponibilidad y acumulación de hojarasca, producto del aporte local o de arrastre, por lo tanto, mayor área de sustrato como refugio o para obtener partículas alimenticias en suspensión.

Se evidencia una posible estacionalidad en la estructura del ensamblaje de macroinvertebrados asociados a hojarasca, a nivel de familia, en el sitio estudiado, lo cual se corroboró cuando se realizó el análisis de las Asociaciones Potencialmente Indicadoras (API's), en donde se observó mayor representatividad de 'EPT' en los meses lluviosos y de MOL en los meses secos y de transición. Sin embargo, otras hipótesis deberán ser contrastadas toda vez que las características del ensamblaje en hojarasca son multifactoriales.

En Quebrada Ancha, en la estación seca, no se presentó el patrón de abundancia observado en algunos estudios que utilizaron la hojarasca como sustrato (Aguila, 2005; Araúz et al., 2000; Ramírez & Pringle, 2006), aunque sí se estimó una mayor riqueza de grupos. Generalmente, se asumía que esto era debido a la disminución de la corriente lo cual permitía la acumulación de la hojarasca e interacción de grupos del ecotono. Consideramos que en esta ocasión pudo influir el 'represamiento' de la quebrada que aumentó el nivel del agua en la colecta de enero entrando ésta en contacto con hojarasca del ecotono, que aportó grupos terrestres.

Es evidente que Quebrada Ancha presenta una hidrodinámica muy particular, influenciada por su geomorfología y bosque de galería recuperado, lo cual puede estar incidiendo en los resultados observados, principalmente los relacionados con la familia Thiaridae.

Número de individuos/g (total y por mes)

La presencia de otro pico de abundancia en noviembre 2018, cuando se utiliza el estimador No.Ind./g puede estar relacionada con la menor cantidad (g) de hojarasca que se colectó en ese mes, lo cual hace la relación No.Ind./g mayor, o podría estar vinculada con ciclos biológicos específicos. En general, la estandarización del método al utilizar No.Ind./g da resultados muy parecidos, se mantiene la dominancia de las mismas familias (Thiaridae, Chironomidae, Hydrobiidae), posiblemente debido a los números grandes que se obtuvieron de las mismas.

Número de taxa (riqueza), Diversidad (H'), Número de taxa/mes

Con relación al mayor número de taxa (28) estimado en la colecta correspondiente al mes de enero 2019, se podría explicar, en parte, debido al mayor nivel del agua que se observó en dicha fecha puesto que vecinos del área colocaron una 'represa' (tronco de palma) aguas abajo del sitio de estudio. Esto pudo promover que parte de la hojarasca colectada incluyera grupos terrestres (Curculionidae, Scarabeidae, Scydmaenidae) o típicos de la zona de transición (Staphylinidae, Lampyridae, Isopoda). Por lo tanto, consideramos que este resultado fue, en parte, un 'artefacto' producto de la ingerencia humana en el sitio de estudio.

Sin embargo, coincidentalmente, García (2004) también reporta dos morfoespecies de Staphylinidae, sólo en el mes de enero de 2000, dejando esto la posibilidad de que sean típicos en esta época. El hecho de que el estimador de Diversidad ($H' = 2.478$) también resultó mayor en enero puede estar relacionado con la falta de dominancia entre los grupos, toda vez que tuvimos la menor abundancia en ese mes (515) y una gran representatividad de taxa 'raros' (poco número, poca frecuencia).

Estamos de acuerdo con Cao et al., (1998) al expresar que estos grupos 'raros' son muy importantes para detectar cambios ecológicos y que su eliminación, al manipular la data para análisis estadístico, puede afectar la sensibilidad de los métodos para evaluar comunidades. Si no hubiésemos considerado el tipo de grupos colectados, es probable que erróneamente hubiésemos relacionado un aumento notorio de riqueza, en enero, con mejores condiciones de la calidad del agua, y con menos degradación.

Número de taxa/g (total y por mes)

La congruencia entre los resultados de la riqueza, estandarizados (No.taxa/g) o no (No.taxa), nos permite confirmar la tendencia de incremento de la riqueza, para los meses de transición entre estación lluviosa y seca, principalmente diciembre y enero. Sin embargo, ya hemos explicado que es posible que el represamiento de la quebrada influyera también en esa tendencia.

La utilización del estimador Número de Individuos o Número de taxa, por gramo de hojarasca (No.Ind./g; No.Taxa/g), lo hemos utilizado anteriormente para 'estandarizar' la muestra y nuevamente nos confirma que al utilizar los datos de Número de Individuos (No.Ind.), que generalmente son números relativamente grandes, hay congruencia entre los datos estandarizados o no, sin embargo, en algunos casos cuando se trabaja con los datos de riqueza, no se observa esa congruencia. Recomendamos utilizar ambos estimadores para estudios de ensamblaje de macroinvertebrados en hojarasca, para tener una información más estandarizada.

La distribución de las APIs muestra una estructura más compleja que aquella observada en el estudio anterior (Aguila & García, 2011) que pudiese también estar relacionada con la mejora del hábitat, con mayor cantidad de hojarasca, debido a la recuperación del bosque de galería. Se presentará el análisis comparativo de los dos estudios (1999 vs 2019) en una próxima publicación.

CONCLUSIONES

El ensamblaje de macroinvertebrados acuáticos, asociados a hojarasca, se caracterizó por una riqueza de 44 familias, incluyendo 60 taxa (familia, géneros) dominando, en orden decreciente, grupos como Thiaridae, Chironomidae, Hydrobiidae y Leptohyphidae. En cuanto a la densidad (No.Ind./g; No.Taxa/g) se concluye que este estimador presenta tendencia parecida al utilizar el de número de individuos, pero no así al utilizar número de taxa. Las Asociaciones Potencialmente Indicadoras (API's) presentaron estacionalidad, de octubre a junio, decreciendo EPT y aumentando MOL. La descarga fue mayor en la estación lluviosa, determinándose una correlación positiva significativa entre descarga y riqueza, No.Ind., No.Ind/g. El patrón granulométrico presentó estacionalidad, determinándose disminución de las partículas de lodo durante la estación seca y correlación positiva significativa entre arena gruesa y No.Ind/g, así como entre arena fina y el lodo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aguila, Y. (2005). Macroinvertebrados acuáticos como indicadores de la calidad del agua, en sitios selectos de la Cuenca del Canal. VIP-01-04-00-03-1998-40; VIP No.033-2005.
- Aguila, Y. (2009). Descripción de la comunidad de insectos acuáticos asociados a sedimento (Red Tipo 'D') en Río Indio, Miguel De La Borda y Coclé del Norte, en temporada lluviosa. VIP-CE-01-00-00-50-2001-01; Cert.CE No.019-2009.
- Aguila, Y. & García, A. (2011). Utilización de las asociaciones de macroinvertebrados potencialmente indicadoras (API's) para discriminar aguas de diferente calidad. *Tecnociencia* 13 (2): 109 - 120.
- Aguila, Y. & García, A. (2012). Descripción de la comunidad de macroinvertebrados asociados a hojarasca y su relación con aguas de diferente calidad, en Nuevo San Juan y Chilibre, Panamá. *Tecnociencia* 14 (1): 103 – 118.
- Aguila, Y. (2014). Utilización de los macroinvertebrados acuáticos como indicadores de la calidad de las aguas. *Scientia* (Panamá), 24 (2): 7-14.
- Aguila S., Y. y García, J. (2021). 'Descripción del ensamblaje de macroinvertebrados acuáticos, asociados a hojarasca, sedimento y comparación con las colectas realizadas en Qbda. Ancha (Provincia de Colón) en los períodos 1999-2000 y 2018-2019'. VIP-01-04-05-2019-20; VIP-DI-2019-REG-175; Cert. No.056-2021.

- Allan, J.D., & Castillo, M.M. (2007). *Structure and Function of Running Waters*. Second Edition, Springer.
- APHA. (2017). *Standard Methods for Examination of Water and Waste Wastewater*. B., Amores, R. & Medianero, E. (2000). Diversidad y distribución de insectos acuáticos a lo largo del cauce del Río Chico (Provincia de Chiriquí, República de Panamá). *Scientia* 15 (1): 27-45.
- Boyero, L., Pearson, R.G. & Bastian, M. (2007). How biological diversity influences ecosystem function: A test with a tropical stream detritivore guild. *Ecological Research* 22: 551-558.
- Boyero, L., Ramírez, A., Dudgeon, D. & Pearson, R.G. (2009). Are tropical streams different? *Journal of the North American Benthological Society* 28 (2): 397-403.
- Boyero, L., Pearson, R.G., Gessner, M.O., Barmuta, L.A., Ferreira, V., Graça, M.A.S., Dudgeon, D. (2011). A global experiment suggests climate warming will not accelerate litter decomposition in streams but might reduce carbon sequestration. *Ecology Letters*, doi: 10.1111/j.1461-0248.2010.01578.x
- Boyero, L., Pearson, R.G., Gessner, M.O., Dudgeon, D., Ramírez, A., Yule, C.M., Callisto, M., Pringle, C.M. (2015). Leaf-litter breakdown in tropical streams: is variability the norm? *Tropical Streams, Freshwater Science*, 34 (2): 759-769.
- Brussock, P.P., Brown, A.V., & Dixon, J.C. (1985). Channel form and stream ecosystem models. *Water Resources Bulletin*, 21: 859-866.
- Bunn, S.E. & Arthington, A.H. (2002). Basic Principles and Ecological Consequences of Altered Flow Regimes for Aquatic Deflation Basin Lakes. *Environmental Management* 30 (4): 492-507.
- Burgos M., A.K. (2020). Estudio de los ensamblajes de macroinvertebrados acuáticos, asociados a hojarasca y sedimento, en Qbda. Ancha, Corregimiento de nuevo San Juan, Provincia de Colón, y comparación con los resultados del período 1999-2000. Tesis de Licenciatura, Escuela de Biología, Universidad de Panamá, 66 pp.
- Camacho, R., Boyero, L., Cornejo, A., Ibáñez, A. & Pearson, R.G. (2009). Local variation in shredder distribution can explain their oversight in Tropical streams.: *Biotropica* 41 (5): 625-632.

- Cao, Y., Williams, D.D., & Williams, N.E. (1998). How important are rare species in aquatic community ecology and bioassessment? *Limnology and Oceanography*, 43 (7): 1403-1409.
- Cornejo, A. & Bernal-Vega, J.A. (2014). Capítulo 10: Panamá. Páginas 377-418. En: P. Alonso Eguía, J.M. Mora, B. Campbell, y M. Springer (eds.) *Diversidad, conservación y uso de macroinvertebrados dulceacuícolas de México, Centroamérica, Colombia, Cuba y Puerto Rico*. Jiutepec. Mor., México, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. 444 pp.
- Cummins, K.W., Merritt R.W., & Berg, M.B. (2019). *An Introduction to the Aquatic Insects of North America*, Fifth Edition, Kendall/Hunt Pub. Co., Dubuque Iowa.
- Dobson. M. (2004). Freshwater crabs in Africa. *Freshwater Forum* 21: 3-26.
- Domínguez, E., & Fernández, H. (2009). *Macroinvertebrados bentónicos sudamericanos*. Tucumán, Argentina: Fundación Miguel Lillo.
- Domínguez, E., Hubbard, M.D., & Peters, W.L. (1992). Clave para ninfas y adultos de las familias y géneros de Ephemeroptera (Insecta) Sudamericanos. Instituto de Limnología Dr. Raúl A. Ringuelet, La Plata, Argentina. *Biología Acuática*, 16 - 32.
- Domínguez O., I. 2018. Uso de suelo, características de la geometría hidráulica, calidad del agua y ensamblajes de insectos acuáticos, asociados a hojarasca, en ríos de la Cuenca Hidrográfica del Canal de Panamá. Tesis de Maestría en Limnología, Universidad de Panamá. 122 pp.
- Ferrington Jr., L.C. & Berg, M. (2019). Chapter 27: Chironomidae. Páginas 1119-1274. En: R.W. Merritt, K. W. Cummins & M.B.Berg (eds.) *An Introduction to the Aquatic Insects of North America*. Fifth Edition, Kendall Hunt Publishing Company, Dubuque Iowa.
- Flowers, R., & De La Rosa, C.. (2010). Capítulo 4: Ephemeroptera. *Revista de Biología Tropical*, 58 (Supl.4) Diciembre, Universidad de Costa Rica.
- García, A. N. (2004). Estudio sobre la comunidad de macroinvertebrados acuáticos, asociados a hojarasca, en ecosistemas lóticos contrastantes. Tesis de Licenciatura, Escuela de Biología, Universidad de Panamá, 137 pp.

- Greathouse, E.A. & Pringle, C.M. (2006). Does the river continuum concept apply on a tropical island? Longitudinal variation in a Puerto Rican stream. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 63: 134-152.
- Gore, J.A., & J. Banning. (2017). Discharge measurements and streamflow analysis. Páginas 49-70. En: F. Richard Hauer y G.A. Lamberty (eds.) *Methods in stream ecology*. Volume 1: Ecosystem structure. Third Edition, Academic Press, Elsevier.
- Graça, M.A.S., Ferreira, R.C.F., & Coimbra, C.N. (2001). Litter processing along a stream gradient: the role of invertebrates and decomposers. *Journal of the North American Benthological Society* 20: 408-420.
- Gutiérrez-Fonseca, P.E. (2010). Plecoptera. En: M. Springer, A. Ramírez y P. Hanson (eds.) *Macroinvertebrados de Agua Dulce de Costa Rica I*. *Revista de Biología Tropical*, 58 (Supl.4) Diciembre. Universidad de Costa Rica
- Hershey, A.E., Lamberty, G.A., Chaloner, D.T., & Northington, R.M. (2010). *Ecology and Classification of North American Freshwater Invertebrates*. Elsevier Inc.
- Higuera G., M. & Gómez, R. (2015). Diversidad de insectos acuáticos asociados a hojarasca en la Quebrada Capisucia o El Barrigón en la Ciudad del Árbol, Chilibre, Panamá. *Tecnociencia* 17 (2): 57-72.
- Helson, J.E. & Williams, D.D. (2013). Development of a macroinvertebrate multimetric index for the assessment of low-land streams in the neotropics. *Ecological Indicators*, 29: 167 – 178.
- Holomuzki, J.R. & Biggs, B.J.F. (2000). Sediment texture mediates high flow effects on lotic macroinvertebrates. *Journal of the North American Benthological Society*. 22(4): 542-553.
- Merritt, R.W., Cummins, K.W., & Berg, M.B. (2017). Chapter 20: Trophic relationships of macroinvertebrates. Páginas: 413-433. En: F. Richard Hauer y G.A. Lamberty (eds.) *Methods in stream ecology*. Third Edition, Volume 1: Ecosystem structure. Academic Press.
- Morse, J.C., Holzenthal, R.W., Robertson, D.R., Rasmussen, A.K., & Currie, D.C. (2019). Chapter 19: Trichoptera. Páginas: 585-764. En: R.W. Merritt, K.W. Cummins & M.B.Berg (eds.) *An Introduction to the Aquatic Insects of North America*. Fifth Edition, KendallHunt Publishing Company, Dubuque Iowa.

- Pardo, J. (2002). Estudio comparativo de la comunidad de Chironomidae (Diptera) en ríos contrastantes en el eje de la Transistmica, Corregimientos de Chilibre y Nuevo San Juan. Tesis de Maestría en Entomología, Vicerrectoría de Investigación y Postgrado, Universidad de Panamá. 85 pp.
- Pearson, R.G., Connolly, N.M. & Boyero, L. (2015). Ecology of streams in a biogeographic isolate—the Queensland Wet Tropics, Australia. *Freshwater Science* 34 (2): 797 - 819.
- PMCC. (2000). Proyecto de Monitoreo de la Cuenca del Canal. Informe Final. The Louis Berger Group.
- Quinn, J.M., & Hickey, C.W. (1994). Hydraulic parameters and benthic invertebrate distributions in two gravel-bed New Zealand rivers. *Freshwater Biology* 32 (3): 489 – 500.
- Ramírez, A. & Gutiérrez-Fonseca, P.E. (2014). Estudios sobre macroinvertebrados acuáticos en América Latina: avances recientes y direcciones futuras. *Revista de Biología Tropical* 62 (Supl 2): 9-20.
- Ramírez, A. & Pringle, C.M. (2006). Temporal and spatial patterns in stream physiochemistry and insect assemblages in tropical lowland streams. *Journal of The North American Benthological Society* 25 (1): 108-125.
- Rodríguez, V., De Gracia, V., & Peña, B. (2014). Familias y géneros de larvas de Trichoptera en los ríos de la provincia de Veraguas y su clasificación trófica en grupos alimenticios funcionales. *Tecnociencia*, 16(2): 33-53.
- Springer, M. (2010). Capítulo 7: Trichoptera. Páginas 151-198. En: M.Springer, A.Ramírez y P. Hanson (eds.) Macroinvertebrados de agua dulce de Costa Rica I, *Revista de Biología Tropical*, 58. (Supl.4). Universidad de Costa Rica.
- Springer, M., Ramirez, A., & Hanson, P. (2010). Macroinvertebrados de agua dulce de Costa Rica. *Revista de Biología Tropical*, 58 (Supl.4) Diciembre. Universidad de Costa Rica.
- Tank, J.L., Rosi-Marshall, E.J., Griffiths, N.A., Entekin, S.A., & Stephen, M.L. (2010). A review of allochthonous organic matter dynamics and metabolism in streams. *Journal of the North American Benthological Society*, 29 (1): 118-146.

- Vannote, R.L., Minshall, G.W., Cummins, J.K.W., Sedell, R., & Cushing, C.E. (1980). The river continuum concept. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 37: 130-137.
- Wantzen, K.M., Yule, C.M., Mathooko, M., & Pringle, C.M. (2008). Chapter 3: Organic matter processing in Tropical streams. Páginas 44-60. En: D. Dudgeon (ed.) *Tropical stream ecology*. Academic Press, Elsevier.
- Yule, C.M., Leong, M.Y., Liew, K.Ch., Ratnarajah, L., Schmidt, K., Wong, H.M., Pearson, R.G. & Boyero, L. (2009). Shredders in Malaysia: Abundance and species richness are higher in Highland, temperate-like, tropical streams. *Journal of The North American Benthological Society* 28 (2): 404 – 415.



Cómo ha surgido el estudio de las emulsiones, y su paso a las emulsiones Pickering de Nanocelulosa: Un análisis bibliométrico

How the study of emulsions has emerged, and their transition to Nanocellulose Pickering emulsions: A bibliometric analysis

Leslie Oses-Chaves

Universidad de Costa Rica, Escuela de Ingeniería Química, Costa Rica.

leslie.oses@ucr.ac.cr,

<https://orcid.org/0009-0005-7609-7165>

Cesar Bernal Samaniego

Universidad de Costa Rica, Sede del Caribe, Costa Rica.

cesar.bernal@ucr.ac.cr

<https://orcid.org/0000-0001-7891-7618>

Eddy Jirón-García

Universidad de Costa Rica, Sede del Caribe, Costa Rica.

eddy.jiron@ucr.ac.cr

<https://orcid.org/0000-0002-7524-9033>

Karina Rodríguez-Mora

Universidad de Costa Rica, Instituto de Investigaciones en Ingeniería, Costa Rica.

karina.rodriguez-mora@ucr.ac.cr

<https://orcid.org/0000-0001-9660-4623>

Fecha de recepción: 20 de febrero de 2025

Fecha de aceptación: 14 de abril de 2025

DOI: <https://doi.org/10.48204/j.tecno.v27n2.a7657>

RESUMEN

Este estudio bibliométrico analiza el desarrollo de las emulsiones y su evolución a las Pickering de nanocelulosa desde su aparición en 2014 hasta 2023. Se accedió a la base de datos Scopus y se emplearon tres ecuaciones de búsqueda específicas. La primera ecuación, permitió identificar un total de 164,392 publicaciones sobre emulsiones en diversas disciplinas. La segunda, reveló 5,619 publicaciones dedicadas específicamente a emulsiones Pickering, con un notable aumento en la producción científica desde 2004. La tercera, enfocada en las emulsiones Pickering de nanocelulosa, mostró un total de 212 publicaciones, más de 50 de ellas en 2023. China lidera la investigación en este campo, seguida por Japón, Canadá y Finlandia. Las aplicaciones clave se encuentran en ciencia de materiales, agricultura e industria alimentaria, y se destacan investigaciones en áreas

como aislamiento térmico y compuestos biodegradables, indicando un futuro prometedor para la nanocelulosa en la innovación industrial sostenible.

PALABRAS CLAVE

Agentes estabilizantes, biopolímeros, mapeos, redes de colaboración

ABSTRACT

This bibliometric study analyzes the development of emulsions and their evolution to nanocellulose Pickering emulsions from their emergence in 2014 to 2023. The Scopus database was accessed, and three specific search equations were used. The first equation identified a total of 164,392 publications on emulsions across various disciplines. The second, revealed 5,619 publications specifically on Pickering emulsions, with a notable increase in scientific output since 2004. The third, focused on nanocellulose Pickering emulsions and showed a total of 212 publications, more than 50 of which were published in 2023. China leads the research in this field, followed by Japan, Canada, and Finland. Key applications are found in material science, agriculture, and the food industry, with notable research in areas such as thermal insulation and biodegradable composites, indicating a promising future for nanocellulose in sustainable industrial innovation.

KEYWORDS

Stabilizing agents, biopolymers, mappings, collaboration networks

INTRODUCCIÓN

Las emulsiones son sistemas en los que se dispersan gotas de un líquido en otro, los cuales son normalmente inmiscibles entre sí. La especie que forma las gotas se conoce como fase dispersa mientras que la restante se conoce como fase continua (Tadros, 2016). Con el propósito de prevenir la separación de estas fases, se emplean sustancias conocidas como surfactantes o tensoactivos (Sun et al., 2022). Estos compuestos juegan un papel esencial en las emulsiones al actuar como agentes estabilizadores interfaciales. Su función primordial radica en alterar las fuerzas intermoleculares entre las fases de aceite y agua, gracias a su estructura química que les confiere la capacidad de interactuar con ambas fases (Chávez et al., 2014).

Estas mezclas líquidas pueden ser de dos tipos principales, las emulsiones directas como la leche, en la cual el aceite se dispersa en agua (O/W); y las emulsiones inversas, como la mantequilla, en las cuales el agua se dispersa en aceite (W/O) (Norton et al., 2013).

Asimismo, las emulsiones se han clasificado de formas más complejas como emulsiones múltiples (W/O/W), y emulsiones estabilizadas por sólidos en la interfase, también conocidas como emulsiones tipo Pickering (Norde, 2011).

Las emulsiones tipo Pickering pueden ser de tipo O/W, W/O o incluso múltiple. Tienen la particularidad que al estar estabilizadas por partículas sólidas pueden o no contener surfactantes (Lee et al., 2021). A pesar de esta distinción, las emulsiones Pickering conservan las propiedades fundamentales de las emulsiones tradicionales. Esto implica que, en la mayoría de los escenarios donde normalmente se emplearía una emulsión convencional, una emulsión Pickering puede desempeñar un papel equivalente. No obstante, la estabilización a través de partículas sólidas confiere características específicas a estas emulsiones, de las cuales su notoria resistencia a la coalescencia es uno de los beneficios más sobresalientes de esta modalidad de estabilización, lo que las hace particularmente idóneas para diversas aplicaciones (Chevalier & Bolzinger, 2013; Schröder et al., 2018).

Actualmente se está produciendo un cambio gradual desde el uso de partículas inorgánicas como sílice, arcillas y carbón (Björkegren et al., 2017) hacia partículas biológicas como la nanocelulosa (Fujisawa et al., 2017) para estabilizar emulsiones con el objetivo de mejorar propiedades como vida útil, calidad y funcionalidad en comparación las emulsiones convencionales (Hu et al., 2016; Schrade et al., 2013). La nanocelulosa ha surgido como un material de interés significativo en este contexto ya que se trata de un nanomaterial natural que posee diversas cualidades destacables como abundancia en la naturaleza, biodegradabilidad, nula toxicidad, y facilidad para funcionalizarse (Dai et al., 2023), además de que puede ser aislada de una variedad de fuentes vegetales, incluyendo residuos de alimentos y otros materiales como el bagazo de yuca, bagazo de caña de azúcar, raquis de palma africana, raquis (fibra) de banano, rastrojo de piña y cáscaras de coco, entre otros (Cherian et al., 2010; Islam et al., 2017; Jirón-García et al., 2022). Estas características hacen que la nanocelulosa sea especialmente atractiva para aplicaciones en emulsiones Pickering.

La producción de emulsiones de nanocelulosa a partir de rastrojo de piña (principal desecho de la producción de piña) en Costa Rica representa una iniciativa técnica prometedora, aprovechando la abundante fuente de materia prima disponible en la región, puesto que se estima que la biomasa de este desecho para 43 000 Ha de cultivo es de $4,282 \times 10^6$ ton/año (Hernández Chaverri & Prado Barragán, 2018). Actualmente las técnicas de tratamiento del rastrojo son contaminantes (como dejarlo a la intemperie o quemarlo), están restringidas en el cultivo orgánico (trituración y adición de herbicidas para reincorporarlo al suelo) o son de alto costo como enterrarlos (Salas Murillo, 2018), siendo su aprovechamiento en la producción de nanocelulosa una ruta innovadora a considerar.

La nanocelulosa puede ser nanocelulosa fibrilar (NCF) o nanocelulosa cristalina (NCC), dependiendo del método de obtención y diferenciadas por la cristalinidad del producto (Vargas Mesén & Rodríguez Mora, 2021). Estas diferencias estructurales influyen en las propiedades de las emulsiones que se pueden formular con ellas (Mishra et al., 2019). Las NCF se usan para crear emulsiones tipo gel, mientras que las estabilizadas con NCC muestran

propiedades reológicas más fluidas. Investigaciones han indicado que las emulsiones estabilizadas con NCF tienden a ser más estables que las formuladas con NCC, lo que sugiere que las diferencias en la morfología entre estos tipos de nanocelulosa afectan las propiedades de las interfaces que estabilizan (Mishra et al., 2019; Parajuli & Ureña-Benavides, 2022; Xue et al., 2017).

Las aplicaciones de este tipo de emulsiones son diversas, la liberación controlada de ingredientes activos y como sustitutos de biopelículas antibacterianas en farmacología, encapsulación de agentes antioxidantes y antibacterianos en alimentos, formulación de tintas para impresión 3D y recuperación mejorada del petróleo en la industria (Gauthier & Capron, 2021; Kumar & Ramachandran, 2005). En agricultura el uso de emulsiones Pickering se centra en la mejora de aplicación de pesticidas o fertilizantes dado que se mejora la dispersión y se disminuye la cantidad de surfactantes por aplicación (Guo, 2021).

METODOLOGÍA

Se realizó una búsqueda sistemática en la base de datos científica Scopus y criterios establecidos por las siguientes ecuaciones de búsqueda:

TITLE-ABS-KEY ("emulsion") AND (LIMIT-TO (DOCTYPE, "ar") OR LIMIT-TO (DOCTYPE, "re")) [1]

TITLE-ABS-KEY ("emulsion") AND ("pickering") AND (LIMIT-TO (DOCTYPE, "ar") OR LIMIT-TO (DOCTYPE, "re")) [2]

TITLE-ABS-KEY ("emulsion") AND ("pickering") AND ("nanocelullose") AND (LIMIT-TO (DOCTYPE, "ar") OR LIMIT-TO (DOCTYPE, "re")) [3]

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las emulsiones se estudiaron científicamente desde 1864, y su relevancia ha crecido mucho hasta hoy. Al realizar el análisis bibliométrico en la base de datos *Scopus*, se identificaron un total de 164,392 documentos que abordan el uso de emulsiones en diversas disciplinas, una muestra de esto es la Figura 1, la cual, detallada la evolución de este campo, específicamente la tendencia en las primeras 5,000 publicaciones.

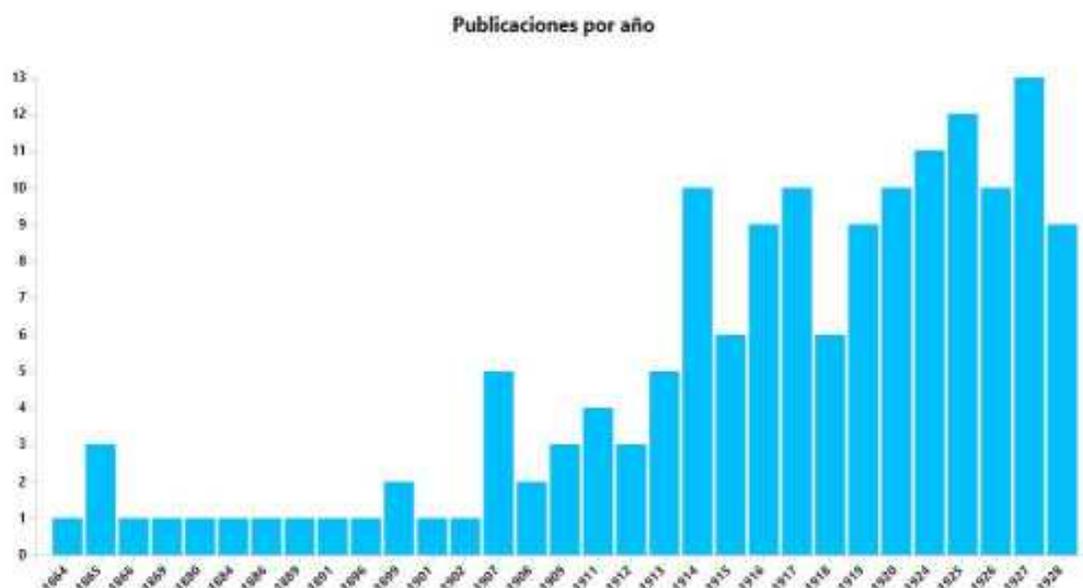
En esta Figura 1, la gráfica que representa las publicaciones por año muestra patrones significativos. Aunque el estudio de las emulsiones comenzó de manera modesta, manteniendo un número de publicaciones anuales menor a 3 en el periodo de 1864 a 1906, se observa un aumento sostenido en la producción científica a lo largo del tiempo. A partir de 1907, se registró un incremento considerable en la cantidad de investigaciones, con un

notable crecimiento en los años posteriores. Las décadas de 1919 y 1938 son particularmente destacadas, alcanzando un máximo en 1927 con 12 publicaciones.

Este análisis de las primeras 5,000 publicaciones refleja la creciente relevancia de las emulsiones en el ámbito científico. En sus inicios, las principales publicaciones se centraban en teorías sobre emulsiones, mientras que las primeras aplicaciones estaban relacionadas principalmente con productos de consumo cotidiano, como los cosméticos y alimentos simples (Bancroft, 1913). A medida que la química de superficies y la ciencia de los coloides avanzaban, las emulsiones comenzaron a ser utilizadas de manera más sofisticada en diversas industrias, además, se reconoció la importancia de las emulsiones en la industria petrolera, especialmente en la recuperación mejorada de petróleo y en la formulación de combustibles y lubricantes (Kuznicki et al., 2017; Pichot et al., 2013).

Figura 1.

Publicaciones por año para los primeros 5000 datos de estudio de emulsiones, generada por el programa Vantagepoint

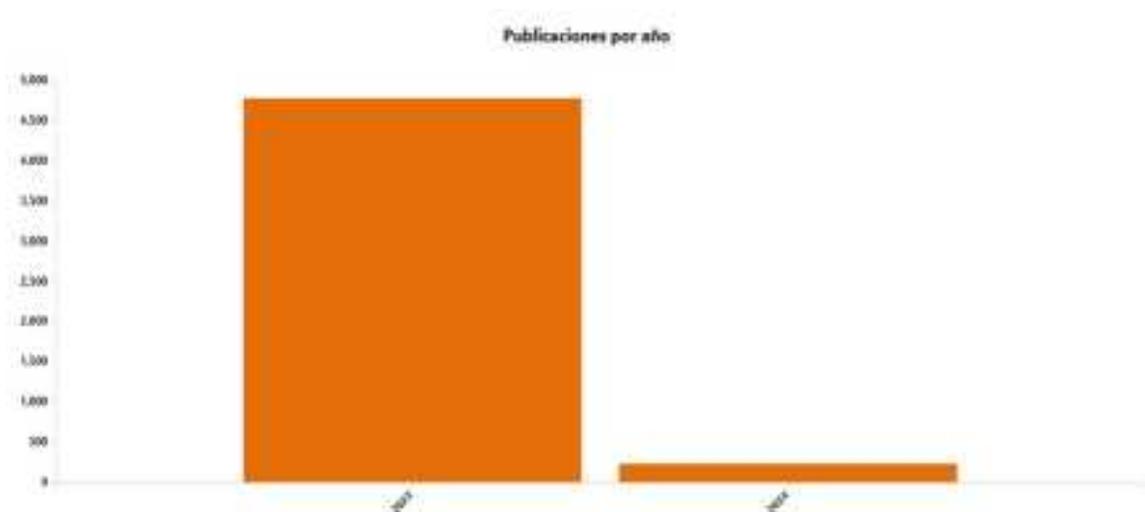


Como consecuencia de esta rápida evolución en el campo de las emulsiones, así como el crecimiento acelerado de la difusión científica, se ha registrado un notable incremento en las publicaciones anuales, alcanzando un número importante en 2023, cuando se publicaron más de 4,500 artículos., como se observa en la Figura 2. Cabe destacar que el análisis se realizó

en noviembre 2023 y en ese periodo ya se encontraban publicaciones con fechas del año posterior, indicando con ello como este tema se encuentra aún en crecimiento.

Figura 2.

Publicaciones por año para los últimos 5000 datos de estudio de emulsiones, generada por el programa Vantagepoint



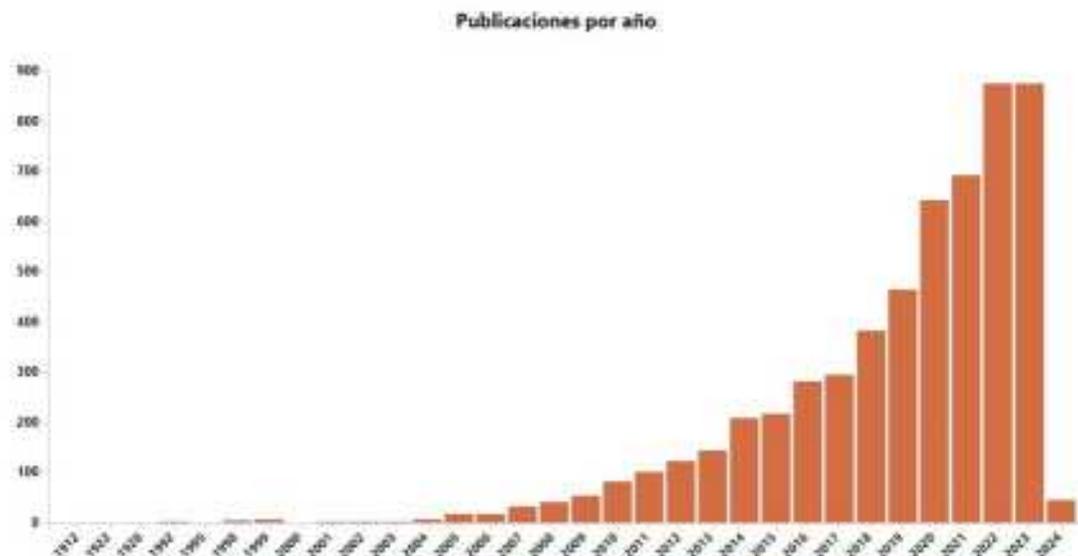
Sin embargo, existen un tipo de emulsiones llamadas Pickering, estas son estabilizada por partículas sólidas en lugar de surfactantes tradicionales, han ganado un interés considerable en los últimos años debido a los avances en las técnicas de síntesis de partículas y al descubrimiento de nuevos coloides con propiedades superficiales ajustables. Este tipo de emulsión se distingue por ofrecer una estabilidad mejorada, una mayor capacidad de carga y, particularmente, por la biocompatibilidad de las partículas estabilizadoras, lo que las convierte en una opción atractiva para diversas aplicaciones industriales y científicas (De Carvalho-Guimarães et al., 2022).

El auge de las emulsiones Pickering inicio muchos años después que las emulsiones convencionales, pues estas comienzan en 1982, mientras que las convencionales tienen registro desde 1864, no obstante, su fase de crecimiento se puede observar a partir del 2005, demostrando ser un tema novedoso. Este aumento significativo se ha acelerado en los

últimos años, con alrededor de 200 publicaciones adicionales en 2022 y 2023 en comparación con 2021, y una tendencia que sigue en ascenso en 2024, lo que subraya la relevancia y expansión de este tema, como se observa en la Figura 3.

Figura 3.

Publicaciones por año para el estudio de emulsiones Pickering, generada por el programa Vantagepoint



Para obtener un estudio más detallado, se utilizó la Ecuación [3], la cual se enfoca en el campo de emulsiones tipo Pickering a partir de nanocelulosa. El desarrollo de este campo ha dado lugar a un total de 212 publicaciones, que se presentan en la Figura 4. Se destaca que las primeras publicaciones se realizaron en 2014, hace una década, lo que indica que este campo de estudio sigue siendo relativamente novedoso. Además, se muestra un crecimiento gradual en la publicación científica, pasando a publicar más de 50 artículos solo en el 2023.

Cabe resaltar que a la fecha del análisis se encontraba dos publicaciones para el año 2024, lo que muestra el interés que se tiene por el crecimiento de esta área. Estas emulsiones se han desarrollado en varios campos de interés importantes, como ciencias de los materiales, química, ingeniería química y agricultura (Gogoi et al., 2024; Koshani et al., 2024; Pinto et al., 2024; Sabet et al., 2024).

Además, existen áreas de interés que actualmente están en auge, como las aplicaciones en la industria de la física y la astronomía, donde se han descubierto propiedades como el aislamiento térmico y el desarrollo de espumas antibacterianas, además de emulsiones alimentarias y películas funcionales (Lu et al., 2022; Roy & Rhim, 2021; Zhu et al., 2021). En el campo de la ingeniería, se han desarrollado diversas aplicaciones, principalmente en la encapsulación y formación de nanocompuestos más estables térmicamente, con una

permeabilidad más controlada, y en la producción de compuestos biodegradables (Chen et al., 2023; Heise et al., 2022; Y. Li et al., 2017). En las áreas de energía y biología, se ha promovido la síntesis de estas emulsiones mediante métodos más ecológicos, que buscan reducir los principales contaminantes generados durante su producción (Ding et al., 2023; Q. Li et al., 2021).

Figura 4.

Publicaciones por año para el estudio de emulsiones Pickering de nanocelulosa, generada por el programa Vantagepoint



Las técnicas de agrupamiento o mapeo son fundamentales en la investigación bibliométrica para identificar grupos de publicaciones, autores, revistas relacionados, países, entre otros (Van Eck & Waltman, 2017). En la Figura 5, se pueden observar las zonas que han contribuido mayormente al estudio de emulsiones Pickering a partir de nanocelulosa, y las relaciones presentes entre ellos. Siendo mayoritaria China el país con mayores publicaciones en el área de interés.

Con respecto a la tendencia a lo largo del tiempo, en la Figura 6, se muestra como China presenta un índice notable de publicaciones recientes, lo que demuestra un esfuerzo continuo y actualizado en la investigación. A diferencia de esto, países como Hungría, Francia, Suecia, Finlandia, Japón y Turquía muestran un ritmo de publicación más lento, con una mayor antigüedad en la mayoría de sus trabajos. Esto sugiere que, aunque estos países han

contribuido al campo, su producción científica se ha mantenido más rezagada en términos de publicaciones recientes.

Este mapeo también permite conocer las redes de colaboración presentes entre diferentes países, lo que refleja que las oportunidades para la difusión global del conocimiento han crecido considerablemente, lo que podría beneficiar a los científicos de regiones periféricas al permitirles acceder al núcleo central de la investigación. Al mismo tiempo, el núcleo central se vuelve más capaz de acceder, integrar y aprovechar la contribución de investigadores de países periféricos como Japón, Estados Unidos, Canadá, Brasil y Finlandia.

Figura 5.

Mapa densidad de publicación por país para las emulsiones Pickering de nanocelulosa, generada por el programa VOSViewer

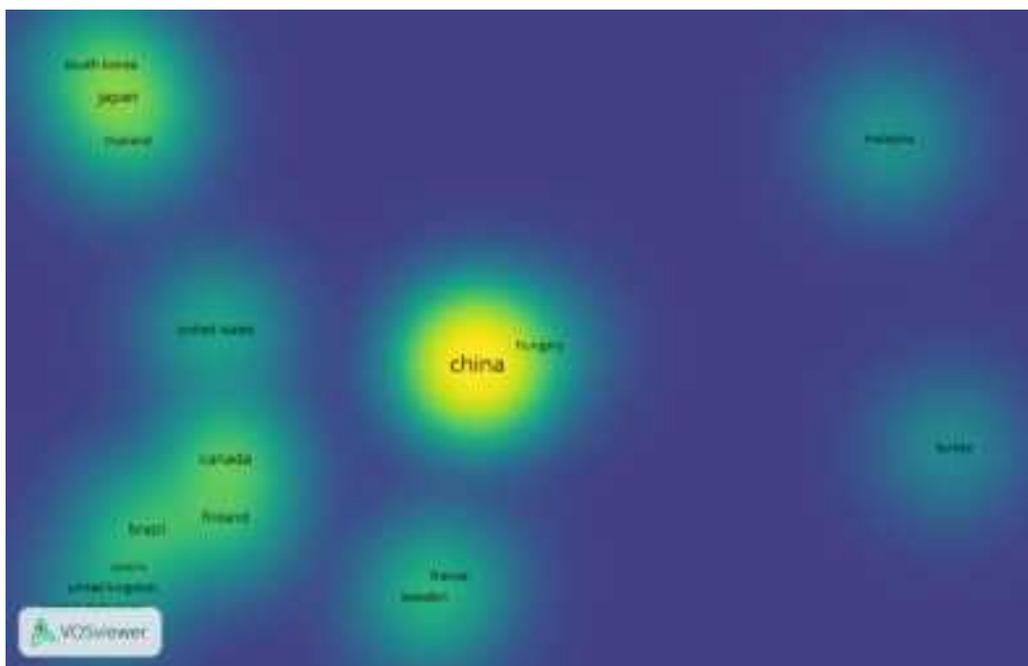
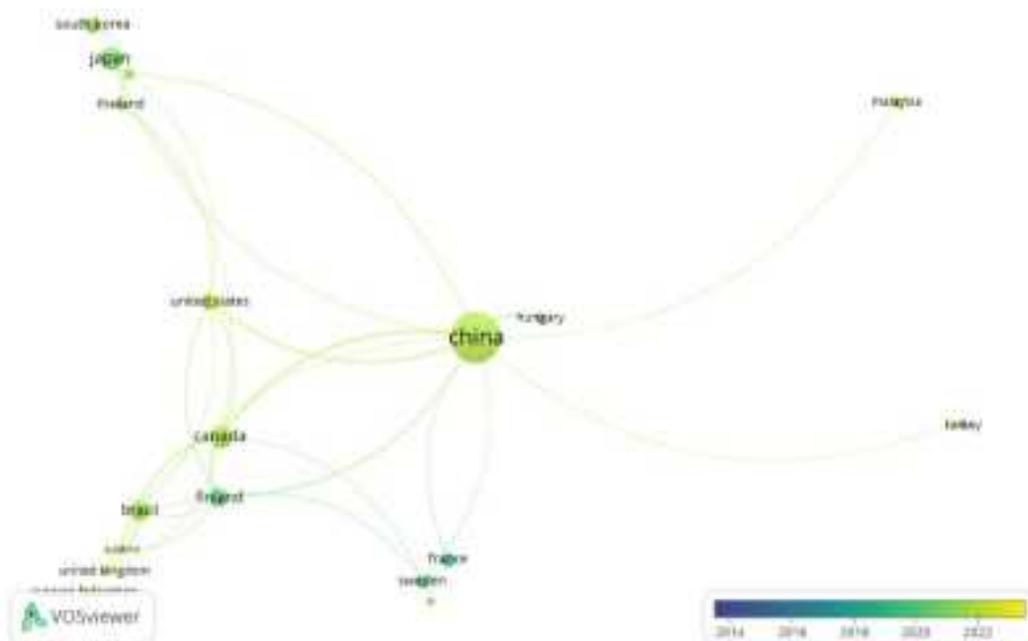


Figura 6.

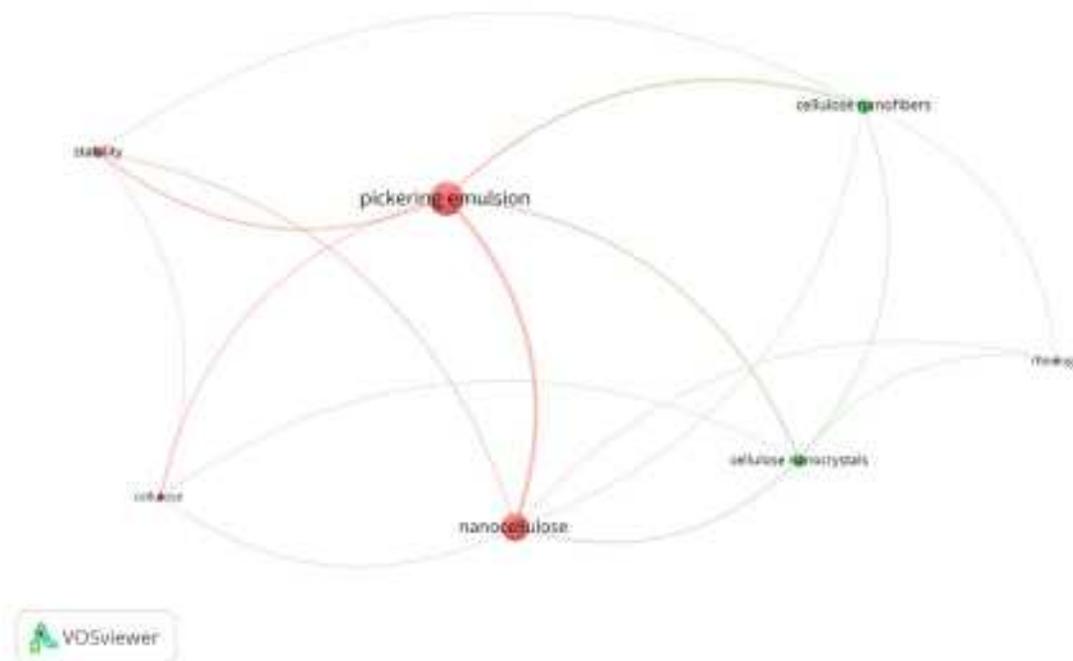
Mapa de índice de publicación y colaboración de países para el estudio de emulsiones Pickering de nanocelulosa acorde a las fechas de publicación, generada por el programa VOSviewer



Al mismo tiempo, utilizando el mapeo científico como herramienta de análisis correlacional, se demuestra la relación entre algunos elementos propios que constituyen las publicaciones científicas (McMahon & Zadnik, 2000). En la Figura 7, por ejemplo, se muestra el vínculo existente entre las palabras clave encontradas al estudiar el campo emulsiones Pickering de nanocelulosa. En donde se identifica el poco empleo de palabra clave con relación a la producción de formulaciones de este tipo de emulsiones, así como proyecciones futuras donde se podrán lograr más contribuciones importantes en diferentes áreas en donde se pueda implementar el uso de nanocelulosa.

Figura 7.

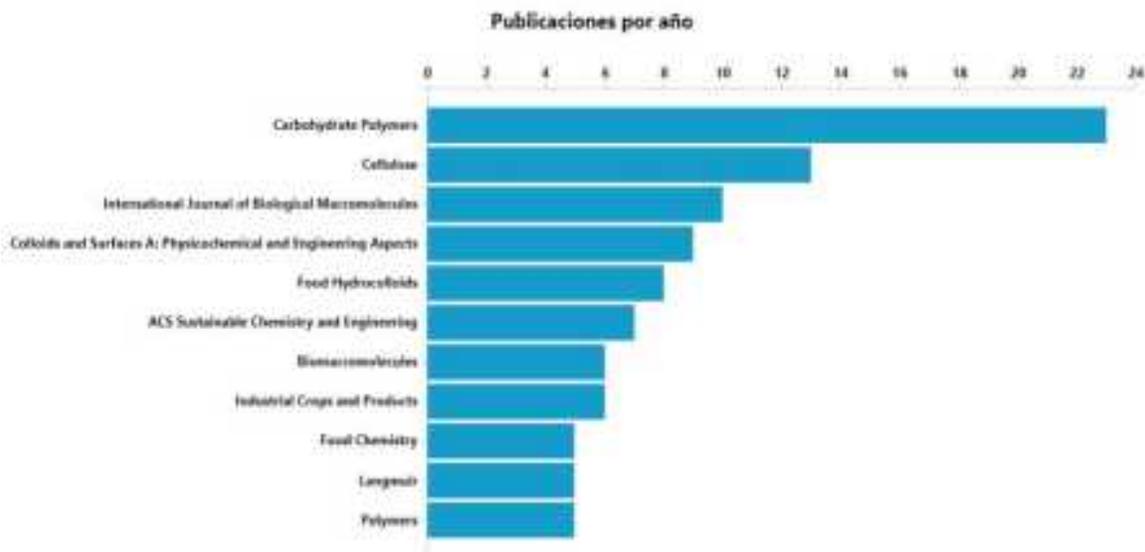
Mapa densidad correlación de palabras clave para las emulsiones Pickering de nanocelulosa generada por el programa VOSViewer



En la Figura 8 se presenta el índice de publicaciones anuales en revistas científicas sobre emulsiones Pickering a base de nanocelulosa, con un enfoque predominante en la ciencia de materiales, específicamente en polímeros y biopolímeros, y su aplicación en la industria alimentaria. Cabe destacar que la revista "Carbohydrate Polymers" publica más de 20 artículos al año sobre este tema. Entre los enfoques más destacados de la revista, se encuentran las aplicaciones de las emulsiones Pickering en la industria alimentaria, así como su potencial uso en el desarrollo de biomateriales (Park et al., 2024; Xu et al., 2024).

Figura 8.

Índice de publicación por revistas para las emulsiones Pickering de nanocelulosa, generada por el programa Vantagepoint

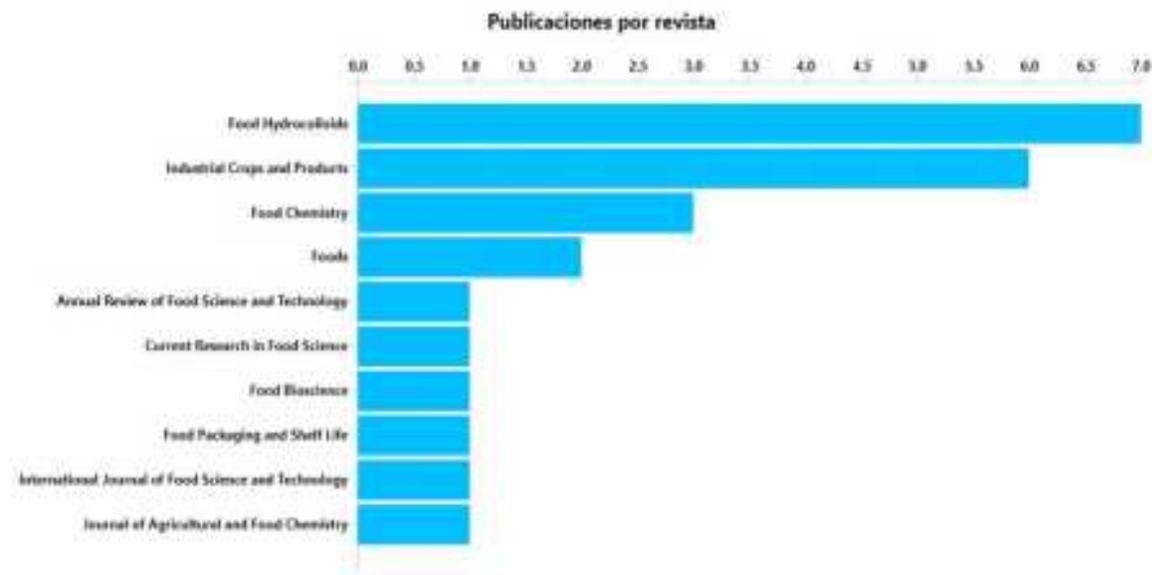


En la Figura 9, al restringir la búsqueda al campo de la agricultura y las ciencias biológicas, se identifican solo 24 publicaciones, de las cuales la mayoría se centran en el área alimentaria. Estas investigaciones reflejan las crecientes preocupaciones sobre la seguridad alimentaria y el impacto ambiental de los surfactantes químicos, lo que ha impulsado el interés en el uso de materiales lignocelulósicos naturales como alternativas sostenibles (Xu et al., 2024). Este interés queda plasmado en la distribución de publicaciones por revista, como se observa en la gráfica adjunta. Las revistas “Food Hydrocolloids” e “Industrial Crops and Products” lideran con el mayor número de publicaciones, seguidas por “Food Chemistry” y “Foods”, lo que confirma el enfoque predominante en las aplicaciones alimenticias de las emulsiones Pickering basadas en nanocelulosa.

La fuerte presencia de estos estudios en revistas especializadas resalta cómo estas emulsiones están ganando relevancia como soluciones ecológicas en la industria alimentaria, enfocándose en la sustitución de surfactantes tradicionales por opciones más sostenibles, y reflejando el potencial de estos materiales tanto para la seguridad alimentaria como para el desarrollo de nuevos biomateriales.

Figura 9.

Índice de publicación por revistas en el área de agricultura y ciencias biológicas para las emulsiones Pickering de nanocelulosa, generada por el programa Vantagepoint



CONCLUSIONES

Las emulsiones Pickering, estabilizadas por partículas sólidas como la nanocelulosa, han demostrado ser una alternativa efectiva frente a las emulsiones tradicionales. Los datos obtenidos a partir de este análisis bibliométrico indican un incremento importante en la investigación sobre emulsiones, con un total de 164,392 publicaciones registradas en diversas disciplinas científicas. En particular, el campo de las emulsiones Pickering ha visto un crecimiento sostenido desde 2004, con más de 5,619 publicaciones enfocadas en este tipo de emulsión, destacando la importancia de sus aplicaciones.

El estudio bibliométrico sobre emulsiones Pickering de nanocelulosa revela un crecimiento significativo desde 2014, con 212 publicaciones, de las cuales más de 50 se generaron solo en 2023. Este aumento refleja un interés relevante en la nanocelulosa como estabilizante. Además, China se destaca como el principal contribuyente en esta área, seguida de países como Japón, Canadá y Finlandia, mientras que otras naciones como Francia y Turquía muestran menor actividad reciente.

Se destaca también la relevancia de estas, en sectores como la ciencia de materiales, la agricultura y la industria alimentaria. Además, las investigaciones en áreas avanzadas como el aislamiento térmico y la producción de compuestos biodegradables apuntan a un futuro prometedor para la nanocelulosa en la innovación industrial sostenible.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bancroft, W. D. (1913). The Theory of Emulsification, V. *The Journal of Physical Chemistry*, 17(6), 501–519. <https://doi.org/10.1021/j150141a002>
- Björkegren, S., Nordstierna, L., Törncrena, A., & Palmqvist, A. (2017). Hydrophilic and hydrophobic modifications of colloidal silica particles for Pickering emulsions. *Journal of Colloid and Interface Science*, 487, 250–257. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2016.10.031>
- Chávez, G., Parra, I., Luzardo, M., Bravo, B., Delgado, N., & Márquez, N. (2014). Influencia de variables de formulación en la viscosidad de emulsiones de surfactante aniónico-aceite-agua. *Química Nova*, 37(2), 200–208. <https://doi.org/10.5935/0100-4042.20140035>
- Cherian, B. M., Leão, A. L., de Souza, S. F., Thomas, S., Pothan, L. A., & Kottaisamy, M. (2010). Isolation of nanocellulose from pineapple leaf fibres by steam explosion. *Carbohydrate Polymers*, 81(3), 720–725. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2010.03.046>
- Chevalier, Y., & Bolzinger, M.-A. (2013). Emulsions stabilized with solid nanoparticles: Pickering emulsions. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 439, 23–34. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2013.02.054>
- Dai, H., Luo, Y., Huang, Y., Ma, L., Chen, H., Fu, Y., Yu, Y., Zhu, H., Wang, H., & Zhang, Y. (2023). Recent advances in protein-based emulsions: The key role of cellulose. *Food Hydrocolloids*, 136, 108260. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2022.108260>
- De Carvalho-Guimarães, F. B., Correa, K. L., de Souza, T. P., Rodríguez Amado, J. R., Ribeiro-Costa, R. M., & Silva-Júnior, J. O. C. (2022). A Review of Pickering Emulsions: Perspectives and Applications. *Pharmaceuticals (Basel, Switzerland)*, 15(11), 1413. <https://doi.org/10.3390/ph15111413>

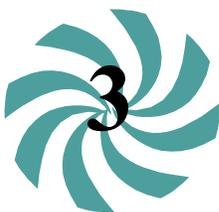
- Fujisawa, S., Togawa, E., & Kuroda, K. (2017). Nanocellulose-stabilized Pickering emulsions and their applications. In *Science and Technology of Advanced Materials* (Vol. 18, Issue 1, pp. 959–971). Taylor and Francis Ltd. <https://doi.org/10.1080/14686996.2017.1401423>
- Gauthier, G., & Capron, I. (2021). Pickering nanoemulsions: An overview of manufacturing processes, formulations, and applications. *JCIS Open (Amsterdam)*, 4, 100036. <https://doi.org/10.1016/j.jciso.2021.100036>
- Gogoi, P., Manhot, N. K., Gautam, G., & Duary, R. K. (2024). Banana peel nanocellulose and soy protein hydrolysate complexed colloidal nanoparticles synthesis using ultrasonic interventions: characterization and stable pickering emulsion formation. *Food Science and Biotechnology*, 33(8), 1859–1869. <https://doi.org/10.1007/s10068-023-01477-w>
- Guo, Q. (2021). Progress in the preparation, stability and functional applications of Pickering emulsion. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 639(1), 012028. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/639/1/012028>
- Hernández Chaverri, R. A., & Prado Barragán, L. A. (2018). Impacto y oportunidades de biorrefinería de los desechos agrícolas del cultivo de piña (*Ananas comosus*) en Costa Rica. *UNED Research Journal*, 10(2), 455–468. <https://doi.org/10.22458/urj.v10i2.2059>
- Hu, Y.-Q., Yin, S.-W., Zhu, J.-H., Qi, J.-R., Guo, J., Wu, L.-Y., Tang, C.-H., & Yang, X.-Q. (2016). Fabrication and characterization of novel Pickering emulsions and Pickering high internal emulsions stabilized by gliadin colloidal particles. *Food Hydrocolloids*, 61, 300–310. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2016.05.028>
- Islam, M. S., Kao, N., Bhattacharya, S. N., & Gupta, R. (2017). An investigation between high and low pressure processes for nanocrystalline cellulose production from agro-waste biomass. *AIP Conference Proceedings*, 1914. <https://doi.org/10.1063/1.5016729>
- Jirón-García, E., Rodríguez-Mora, K., & Bernal-Samaniego, C. (2022). Obtención de nanocelulosa a partir de raquis de palma africana y bagazo de caña. *Revista Tecnología En Marcha*, 35(2 SE-Artículo científico), Pág. 167-181. <https://doi.org/10.18845/tm.v35i3.5609>

- Koshani, R., Yeh, S.-L., Pitcher, M. L., & Sheikhi, A. (2024). Antiscaling Pickering Emulsions Enabled by Amphiphilic Hairy Cellulose Nanocrystals. *ACS Applied Materials and Interfaces*, 16(32), 42802–42815. <https://doi.org/10.1021/acsami.4c03451>
- Kumar, S., & Ramachandran, U. (2005). Studies Directed towards Asymmetric Synthesis of Levobupivacaine. *Tetrahedron Lett.*, 46, 19.
- Kuznicki, N. P., Harbottle, D., Masliyah, J. H., & Xu, Z. (2017). Probing Mechanical Properties of Water–Crude Oil Interfaces and Colloidal Interactions of Petroleum Emulsions Using Atomic Force Microscopy. *Energy & Fuels*, 31(4), 3445–3453. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.6b02451>
- Lee, K. K., Low, D. Y. S., Foo, M. L., Yu, L. J., Choong, T. S. Y., Tang, S. Y., & Tan, K. W. (2021). Molecular dynamics simulation of nanocellulose-stabilized pickering emulsions. *Polymers*, 13(4), 1–15. <https://doi.org/10.3390/polym13040668>
- McMahon, T. T., & Zadnik, K. (2000). Twenty-five Years of Contact Lenses: The Impact on the Cornea and Ophthalmic Practice. *Cornea*, 19(5), 730–740. <https://doi.org/10.1097/00003226-200009000-00018>
- Mishra, S., Kharkar, P. S., & Pethe, A. M. (2019). Biomass and waste materials as potential sources of nanocrystalline cellulose: Comparative review of preparation methods (2016 – Till date). *Carbohydrate Polymers*, 207, 418–427. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2018.12.004>
- Norde, W. (2011). *Colloids and Interfaces in Life Sciences and Bionanotechnology*. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781439873038>
- Norton, J. E., Fryer, P. J., & Norton, I. T. (2013). Introduction to Food Formulation Engineering. In *Formulation Engineering of Foods* (pp. 1–8). Wiley. <https://doi.org/10.1002/9781118597651.ch1>
- Parajuli, S., & Ureña-Benavides, E. E. (2022). Fundamental aspects of nanocellulose stabilized Pickering emulsions and foams. *Advances in Colloid and Interface Science*, 299, 102530. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cis.2021.102530>
- Park, J. Y., Cho, D.-H., Choi, D. J., Moon, S. Y., Park, E. Y., & Kim, J.-Y. (2024). Preparation of catechin-starch nanoparticles composites and its application as a Pickering emulsion stabilizer. *Carbohydrate Polymers*, 332, 121950. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2024.121950>

- Pichot, R., Watson, R. L., & Norton, I. T. (2013). Phospholipids at the interface: current trends and challenges. *International Journal of Molecular Sciences*, 14(6), 11767–11794. <https://doi.org/10.3390/ijms140611767>
- Pinto, N. O. F., Bourbon, A. I., Martins, D., Pereira, A., Cerqueira, M. A., Pastrana, L., Gama, M., Azeredo, H. M. C., Rosa, M. F., & Gonçalves, C. (2024). Bacterial cellulose nanocrystals or nanofibrils as Pickering stabilizers in low-oil emulsions: A comparative study. *Food Hydrocolloids*, 157. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2024.110427>
- Sabet, S., Kazerani García, A. A., Kirjoranta, S., Pinto, T. C., Siven, M., Bhattarai, M., Barba, L., & Valoppi, F. (2024). Development of the first “encapsulated oleogel-in-oleogel” system with tailorable lipid digestion. *Food Hydrocolloids*, 153. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2024.110068>
- Salas Murillo, O. (2018, June 21). *Desechos de la piña: un dolor de cabeza para productores*. Noticias Universidad de Costa Rica. <https://www.ucr.ac.cr/noticias/2018/06/21/desechos-de-la-pina-un-dolor-de-cabeza-para-productores.html>
- Schrade, A., Landfester, K., & Ziener, U. (2013). Pickering-type stabilized nanoparticles by heterophase polymerization. *Chemical Society Reviews*, 42(16), 6823. <https://doi.org/10.1039/c3cs60100e>
- Schröder, A., Corstens, M. N., Ho, K. K. H. Y., Schroën, K., & Berton-Carabin, C. C. (2018). Pickering Emulsions. In *Emulsion-based Systems for Delivery of Food Active Compounds* (pp. 29–67). Wiley. <https://doi.org/10.1002/9781119247159.ch2>
- Sun, Z., Yan, X., Xiao, Y., Hu, L., Eggersdorfer, M., Chen, D., Yang, Z., & Weitz, D. A. (2022). Pickering emulsions stabilized by colloidal surfactants: Role of solid particles. In *Particuology* (Vol. 64, pp. 153–163). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.partic.2021.06.004>
- Tadros, T. F. (2016). *Emulsions : Formation, Stability, Industrial Applications*. Walter de Gruyter GmbH.
- van Eck, N. J., & Waltman, L. (2017). Citation-based clustering of publications using CitNetExplorer and VOSviewer. *Scientometrics*, 111(2), 1053–1070. <https://doi.org/10.1007/s11192-017-2300-7>

- Vargas Mesén, J., & Rodríguez Mora, K. (2021). Funcionalización de nanocelulosa a partir de rastrojo de piña y raquis de palma africana. *Científica*, 25(2), 1–19. <https://doi.org/10.46842/ipn.cien.v25n2a08>
- Xu, Y., Liu, Y.-H., Xu, L.-H., Sun, S.-C., Wen, J.-L., & Yuan, T.-Q. (2024). Multifunctional composite film of curcumin Pickering emulsion stabilized by lignocellulose nanofibrils isolated from bamboo shoot shells for monitoring shrimp freshness. *Carbohydrate Polymers*, 346, 122663. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2024.122663>
- Xue, Y., Mou, Z., & Xiao, H. (2017). Nanocellulose as a sustainable biomass material: structure, properties, present status and future prospects in biomedical applications. *Nanoscale*, 9(39), 14758–14781. <https://doi.org/10.1039/c7nr04994c>
- Chen, Y., Lu, T., Li, L., Zhang, H., Wang, H., & Ke, F. (2023). Fully biodegradable PLA composite with improved mechanical properties via 3D printing. *Materials Letters*, 331. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2022.133543>
- Ding, Y., Feng, L., Zhang, Z., Zhang, S., Zhang, X., Li, Y., Fang, X., Hu, X., Wang, X., Tam, K. C., Zhou, G., & Zhang, Z. (2023). Lignocellulose Nanoparticles Extracted from Cattle Dung as Pickering Emulsifiers for Microencapsulating Phase Change Materials. *ACS Sustainable Chemistry and Engineering*, 11(38), 14255–14266. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.3c05314>
- Heise, K., Jonkergouw, C., Anaya-Plaza, E., Guccini, V., Pääkkönen, T., Linder, M. B., Kontturi, E., & Kostianen, M. A. (2022). Electrolyte-Controlled Permeability in Nanocellulose-Stabilized Emulsions. *Advanced Materials Interfaces*, 9(26). <https://doi.org/10.1002/admi.202200943>
- Li, Q., Ma, Z., Meng, D., Sui, X., & You, C. (2021). Facile biosynthesis of synthetic crystalline cellulose nanoribbon from maltodextrin through a minimized two-enzyme phosphorylase cascade and its application in emulsion. *Journal of Biotechnology*, 332, 54–60. <https://doi.org/10.1016/j.jbiotec.2021.03.018>
- Li, Y., Yu, S., Chen, P., Rojas, R., Hajian, A., & Berglund, L. (2017). Cellulose nanofibers enable paraffin encapsulation and the formation of stable thermal regulation nanocomposites. *Nano Energy*, 34, 541–548. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2017.03.010>

- Lu, P., Zhao, H., Zhang, M., Bi, X., Ge, X., & Wu, M. (2022). Thermal insulation and antibacterial foam templated from bagasse nanocellulose /nisin complex stabilized Pickering emulsion. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 220. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2022.112881>
- Roy, S., & Rhim, J.-W. (2021). Gelatin/agar-based functional film integrated with Pickering emulsion of clove essential oil stabilized with nanocellulose for active packaging applications. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 627. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2021.127220>
- Zhu, M., Huan, S., Liu, S., Li, Z., He, M., Yang, G., Liu, S., McClements, D. J., Rojas, O. J., & Bai, L. (2021). Recent development in food emulsion stabilized by plant-based cellulose nanoparticles. *Current Opinion in Colloid and Interface Science*, 56. <https://doi.org/10.1016/j.cocis.2021.101512>



Caracterización mediante Cromatografía de Gases acoplada a un detector de masas (GC-MS) de biodiesel obtenido a partir de aceite reutilizado

Characterization by Gas Chromatography coupled to a biodiesel mass detector (GC-MS) obtained from reused oil

Lourdes Arjona

Universidad de Panamá, Facultad de Ciencias Naturales, Exactas y Tecnología, Panamá.
lourdes.arjona@up.ac.pa <https://orcid.org/0000-0002-0679-4337>

Felipe Barriá

Universidad de Panamá, Facultad de Ciencias Naturales, Exactas y Tecnología, Panamá
felipe.barria@up.ac.pa <https://orcid.org/0009-0007-2267-2739>

Xavier Ortega

Universidad de Panamá, Facultad de Ciencias Naturales, Exactas y Tecnología, Panamá.
xavier.ortega@up.ac.pa <https://orcid.org/0009-0009-6934-8279>

Gerardo Cáceres

Universidad de Panamá, Facultad de Ciencias Naturales, Exactas y Tecnología, Panamá.
gerardo.caceres@up.ac.pa <https://orcid.org/0000-0002-7029-6754>

Fecha de recepción: 24 de septiembre de 2024

Fecha de aceptación: 14 de abril de 2025

DOI: <https://doi.org/10.48204/j.tecno.v27n2.a7658>

RESUMEN

En este trabajo se obtuvo y caracterizó biodiésel a partir de aceite de cocina utilizado y metanol por medio de la reacción de transesterificación, con el objetivo de aprovechar el aceite de desecho (recurso de triglicéridos de bajo valor industrial) como materia prima y de esta manera contribuir a minimizar el impacto ambiental. Con la metodología empleada, el biodiesel producido a partir del aceite de desecho presenta características similares al biodiesel obtenido de aceite virgen, como se confirmó mediante la caracterización de la muestra por medio de diversas pruebas fisicoquímicas y por cromatografía de gases acoplada a espectrometría de masas (GC-MS). La realización de este proyecto de investigación generó información y *know-how* relevante en lo referente a la metodología para la correcta caracterización mediante los espectros de masas de los principales

esteres metílicos de ácidos grasos (FAME) presentes en los biodiéselos producidos, entre los FAME que se lograron identificar se encuentran éster metílico octanoico, decanoico y octadecanoico. Estos resultados permiten confirmar que el biodiésel obtenido a partir de aceite de cocina es una alternativa viable y sostenible, además la caracterización analítica mediante GC-MS proporcionó información de los FAME, lo que facilita su comparación con estándares de calidad y su posible aplicación en motores diésel. De esta manera, el estudio contribuye a afirmar que el escalado de la metodología aquí propuesta es factible y podría contribuir al desarrollo de biocombustibles en Panamá promoviendo una gestión ambiental enmarcada dentro de la economía circular.

PALABRAS CLAVE

Biodiésel, medio ambiente, combustible, cromatografía de gases acoplada a un detector de masas (GC-MS), transesterificación.

ABSTRACT

In this work, biodiesel was obtained and characterized from used cooking oil and methanol by means of the transesterification reaction, with the aim of using waste oil (a low-value triglyceride resource) as a raw material and thus contributes to minimizing environmental impact. With the methodology used, biodiesel produced from waste oil shows characteristics like biodiesel obtained from virgin oil, as could be seen when characterizing each of the samples characterized by means of various physicochemical tests and by GC-MS chromatography. The realization of this research project generated relevant information and *know-how* regarding the methodology for the correct characterization by GC-MS of the main components (FAME) present in the biodiesels produced. Among the FAMEs that were characterized are the methyl octanoic, decanoic and octadecanoic esters. These results confirm that biodiesel obtained from cooking oil is a viable and sustainable alternative. In addition, the analytical characterization by GC-MS provided information on FAME, which facilitates its comparison with quality standards and its possible application in diesel engines. In this way, the study contributes to affirming that the scaling of the methodology proposed here is feasible and could contribute to the development of biofuels in Panama, promoting environmental management within the framework of the circular economy.

KEYWORDS

Biodiesel, environment, fuel, gas chromatography mass spectrometry (GC-MS), Transesterification.

INTRODUCCIÓN

La humanidad está enfrentando dos eventos de preocupación global, el deterioro ambiental (Verscheure *et al.*, 2023) y la crisis energética mundial (Simshauser, 2023). Ambos problemas emergen de la demanda de energías no renovables, principalmente los combustibles fósiles; los cuáles en 2023, representaron el 82 % del uso de energía primaria, indicativo mundial de la dependencia de esta. En las fuentes de energía evaluadas incluidas durante este período (petróleo, carbón, gas natural, energías renovables, nuclear e hidrógeno); destaca como la principal, el petróleo. Los valores de mayor interés en base al consumo anual para estas fuentes registrados en orden descendente fue para la gasolina (1.8 millones de b/d) y del

diésel/gasóleo (1.3 millones de b/d); y se reportan como los principales demandantes los EE.UU, China y la UE (BP, 2022). Como dato relevante, las energías primarias renovables (incluidos los biocombustibles) registraron un aumento anual de un 15 %.

Los aspectos negativos de la fuerte dependencia de los combustibles fósiles se reflejan en el aumento en los indicadores ambientales asociados a las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) cuyas incidencias son evidenciadas en el cambio climático. El principal contribuyente en las emisiones de GEI es el combustible diésel utilizado principalmente en los sectores de la construcción, transporte, agricultura e industrias en general (Tan *et al.*, 2023).

El motor diésel se caracteriza por emitir importantes cantidades de contaminantes como hidrocarburos (HC), óxidos de nitrógeno (NO_x), dióxido de carbono (CO₂), monóxido de carbonos (CO) y materiales particulados (MP). EE.UU reportó que el 76 % de procesos equivalente a la producción de dióxido de carbono fue causado por la combustión de combustibles fósiles, y que de ellos, el 98 % del CO₂ proviene de motores diésel (Naciones Unidas, 2023).

En el 2015, las Naciones Unidas (ONU) hizo un llamado universal y se logra aprobar la agenda 2030 sobre el desarrollo sostenible, el objetivo de la agenda plantea los lineamientos mundiales para emprender un nuevo camino y mejorar las condiciones de vida de forma equitativa y global (ONU, 2023). Esta agenda cuenta con 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), incluido desde la eliminación de la pobreza (ODS 1), energías no contaminantes (ODS 7) y el combate del cambio climático (ODS 13) (*Organización Meteorológica Mundial*, 2020).

Al reducir las emisiones a producto de la combustión, propiciará un efecto reductor de los GEI. Se proponen utilizar métodos como es la recirculación de gases de escape (EGR) (Shi *et al.*, 2023) y los combustibles alternativos (Gebreslassie, Bahta & Mihrete, 2023). Estos combustibles deben poseer características puntuales y necesarias como su capacidad de renovación, fuentes de producción y posterior utilización de manera limpia y eficiente para lograr los propósitos de su uso, así aliviar la escasez de energía, además el disminuir la contaminación ambiental. La química, matemática, biología, ingeniería y la industria, han unido esfuerzos para lograr avances en la biología sintética (Liu, Wang and Nielsen, 2022) para la producción de biocombustibles de una manera más precisa y eficiente a partir de células microbianas. Dos tipos de biocombustibles líquidos que en los últimos veinte años han tenido un crecimiento destacado en cuanto a su producción y consumo son el bioetanol y el biodiésel.

En el año 1912, Rudolf Diesel señaló “Hoy en día el uso de aceites vegetales como combustible puede carecer de importancia, pero el tiempo mostrará como estos productos pueden ser tan importantes como el petróleo”. En sus inicios estos se usaban sin modificar, sin embargo, debido a las altas temperaturas que alcanzaba en la cámara de combustión, los aceites podían experimentar descomposición térmica, previa a la combustión, lo cual también contribuye a la formación de depósitos en inyectores, cámara, pistones y válvulas. Una adecuación efectiva fue modificar los aceites, generando un combustible similar al diésel convencional, siendo así como surge el biodiésel.

Un biodiésel es un combustible líquido fabricado a base de aceite vegetal y animal, el principal componente del biodiésel son ésteres alquílicos de cadena larga, por lo general ésteres metílicos, propílicos o etílicos. El estándar de la Sociedad Americana de pruebas y materiales (ASTM) describe al biodiesel como “ésteres mono alquílicos de ácidos grasos de cadena larga, derivado de lípidos tales como aceites vegetales o grasas (ASTM D6751, 2023).

El biocombustible está destinado a ser usado en motores diésel estándar, al utilizarse solo o como mezcla de biodiésel con petrodiesel (Kousoulidou *et al.*, 2012). Las propiedades son muy similares a las del gasoil de origen fósil. Esta similitud permite hacer mezcla de biodiésel y gasoil en proporciones que se desea B5, B10, B30, B50. En el año 2021 se produjeron 38.3 millones de toneladas de biodiésel en el mundo, siendo Indonesia el mayor productor de este biocombustible, con más de 8.2 millones de toneladas y en el continente americano, Brasil se posiciona en el primer lugar con 5.92 millones de toneladas (Progress, The and Annual, 2022). El biodiesel se considera una alternativa renovable por su menor huella de carbono en el aspecto del ciclo de vida, esto se debe a que la energía liberada y el CO₂ producto de la combustión del biodiesel, se compensa con la absorción durante el crecimiento de las materias primas como el girasol, la palma, soya y otras fuentes vegetales utilizadas para la producción de este combustible (Shirk *et al.*, 2017).

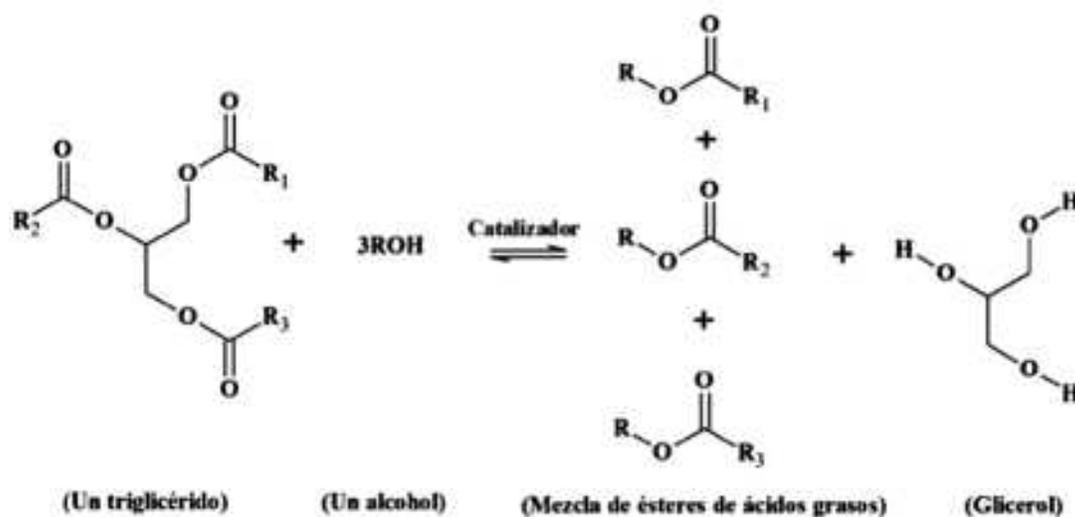
En los últimos años han surgido una gran variedad de técnicas para su producción, como la descomposición térmica del aceite por pirólisis (Yousef *et al.*, 2023), preparación de micro emulsiones (Leng *et al.*, 2018) y la conversión de triglicéridos en mezclas de ésteres simples, mediante la reacción química de transesterificación (Babadi *et al.*, 2022).

Para la producción de biodiésel, en sus inicios, solo se utilizaba aceites vegetales vírgenes comestibles como el aceite de soya, girasol o palma (Rupilius & Ahmad, 2007; Zahan & Kano, 2018), estos aceites son fácilmente disponible y proporcionan un rendimiento alto de biodiésel, sin embargo ha generado grandes preocupaciones debido a la competencia de alimentos, por ser producto con alto valor nutricional, es por eso que la producción de biodiésel ha emigrado a utilizar como materias primas aceites no comestibles, aceites

reutilizados ya sea de cocina u otras fuentes (Rodionova *et al.*, 2017) como es el caso de los utilizados en este estudio.

Cualquiera que sea la materia prima la reacción que se ha establecido para la producción de biodiésel es la transesterificación (Figura 1). Es una reacción estequiométrica donde el glicerol contenido en el aceite es remplazado por el alcohol en presencia del catalizador. Esta reacción se desarrolla en proporción estequiométrica (molar) de alcohol a triglicérido de 3 a 1, es decir a mol de triglicérido reacciona con 3 moles de alcohol, para producir 3 moles de éster y 1 mol de glicerol (Corral-Bobadilla *et al.*, 2024). El combustible producto de esta materia prima y el proceso de transesterificación se caracteriza por su bajo contenido de azufre y compuestos aromáticos, alto índice de cetónico, lubricidad y regenerabilidad, lo que puede garantizar una reducción de aproximadamente 70–90 % en las emisiones de GEI (Azman *et al.*, 2021)

Figura 1.
Reacción de transesterificación



Las principales materias primas utilizadas para llevar a cabo esta reacción son: aceites vegetal o animal, alcohol de bajo peso molecular anhidro (metanol, etanol o isopropanol) y catalizadores ácidos o básicos, ya sean como catalizadores homogéneos o heterogéneos. Es importante que las materias primas estén libres de agua, para evitar la reacción de saponificación, reacción secundaria indeseable. Además, los triglicéridos deben tener una baja proporción de ácidos grasos libres para evitar que se neutralicen con el catalizador y se formen jabones.

El control de calidad del producto final es fundamental para garantizar al consumidor el desempeño eficiente del biodiesel y su compatibilidad con las normativas ambientales. La

literatura enfatiza que el enfoque principal en la producción de biodiesel se refiere al desempeño tanto en el diseño, la optimización y la caracterización (Corral-Bobadilla *et al.*, 2024). La ASTM sugiere realizar pruebas como humedad, viscosidad, índice de acidez, contenido de glicerina y composición de FAME permitiendo evaluar la calidad de biodiesel (ASTM D6751, 2023) y la norma europea 14214:2013 (Norma española UNE-EN 14214, 2013), para la identificación de los FAME esta norma hace referencia a la EN 14331 (Norma española UNE-EN 14331, 2004) y la UNE-EN ISO 5508 (Norma Española UNE-EN ISO 5508, 1996) proporciona directrices generales para determinar por cromatografía de gases y composición cualitativa de los FAME.

Mediante esta investigación se busca producir biodiesel a partir de aceite de cocina usado (procedentes de cocinas comerciales o industriales) utilizando metanol anhidro y un catalizador básico. La principal contribución de trabajo radica en la caracterización del producto final utilizando un cromatógrafo de gases (GC-MS) acoplado a un detector de masas y mediante los resultados obtenidos comparar la composición de los FAME en los productos formulados. El proceso se enmarcó en los principios de la economía circular, cuyo punto focal está minimizar el impacto ambiental y maximizar el aprovechamiento de los recursos de bajo valor industrial.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se utilizaron 3 formulaciones en la producción de biodiésel variando la materia prima. (1) 100% de aceite de cocina reutilizado (BD-100); (2) 50% de aceite de cocina reutilizado y 50% de aceite virgen (BD-50); (3) 100% aceite vegetal virgen (BD-0). Hidróxido de Sodio y Metanol Grado ACS, Marca: Sigma-Aldrich, mezcla estándar de 37 FAMEs (Restek Corporation).

Preparación de la materia prima

El aceite reutilizado, por lo general en aplicaciones culinarias, contiene una considerable cantidad residuos sólidos y otras impurezas. Es por esto por lo que, antes de formular el producto, se debe acondicionar los aceites mediante una serie de operaciones unitarias. Para lograr la optimización de este proceso se revisaron estudios previos (Rupilius and Ahmad, 2007) y (Zahan and Kano, 2018).

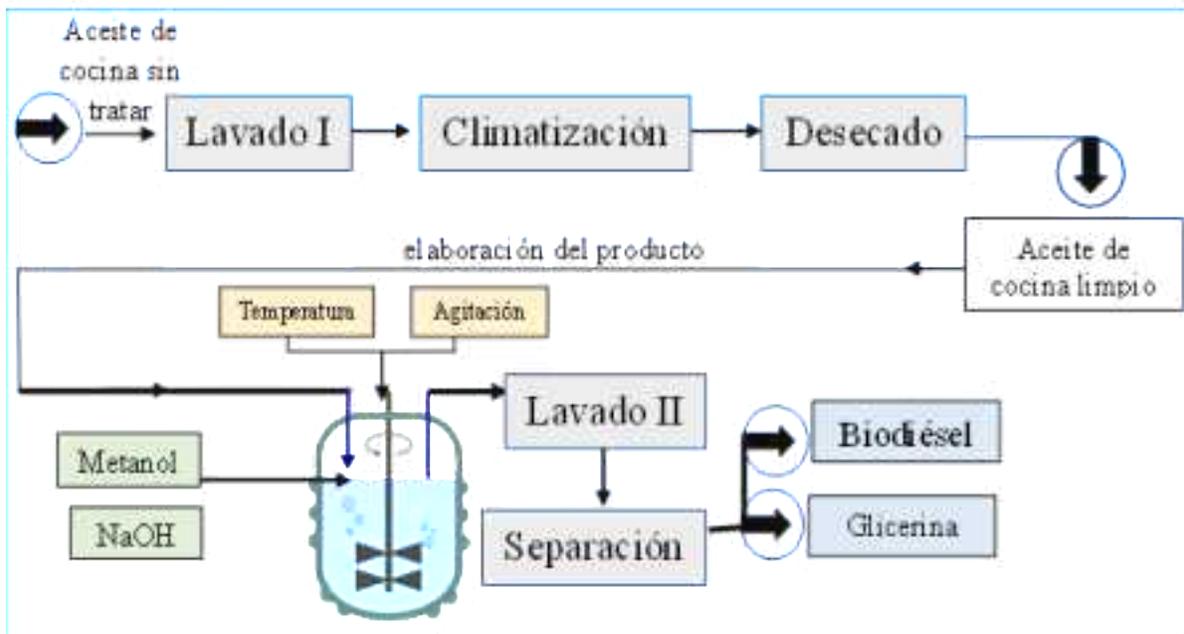
La materia prima se acondiciona al realizarle en tres operaciones unitarias básicas (Figura 2) que son: i) el lavado (eliminación de impurezas y ácidos grasos libres), ii) la climatización (para evitar cristales a bajas temperaturas) y iii) el desecado (para llevar al mínimo posible la presencia de humedad).

El lavado I, se realizó con sosa cáustica al 50 % en una proporción de 1:1 en volumen, a temperaturas superior a 30 °C y con agitación constante. El propósito de esta operación es eliminar impurezas y los ácidos grasos libres. Posteriormente se procede a la climatización, operación que comprende en calentar el aceite hasta 32 °C aproximadamente y luego disminuir la temperatura por debajo de 10 °C durante 24 horas (Figura 3), para separar las grasas saturadas. El resultado de la climatización son dos fases que se separan por decantación.

En la última operación, el desecado, se calentó el aceite entre 70 y 80 °C por alrededor de 12 horas, donde se eliminó la mayor cantidad de agua contenida en la materia prima, para esto.

Figura 2.

Proceso general para la obtención de biodiésel



Obtención del biodiésel

Para la obtención de biodiésel, se utilizaron 200 mL de aceite reutilizado previamente acondicionado, soda cáustica (NaOH) aproximadamente 2.00 g y 160 mL de metanol anhidro. Se mezcló cuidadosamente en un recipiente y se calentó en un rango de 45-60 °C por 45 minutos con agitación constante, se dejó reposar el producto y se separaron las fases

utilizando un embudo de decantación donde se recolectó el biodiésel y como subproducto el glicerol (Figura 4A).

Figura 3.

Acondicionamiento de los aceites que se utilizó posteriormente como materia prima



Purificación del producto

La purificación del biodiésel tiene como objetivo remover los restos de reactivos en exceso y contaminantes presentes. Esta purificación se realizó con una solución de NaCl al 6.0 % m/m (Figura 4B), en una cantidad equivalente al 20% del volumen del biodiesel correspondiente. Se mezcló y decantó la solución.

Figura 4.

Separación del biodiésel y la glicerina (A), purificación de biodiésel (B)



Caracterización de la materia prima y del producto terminado

Se realizaron pruebas de caracterización fisicoquímicas siguiendo la norma ASTM (ASTM D6751, 2023). En esta norma se describen los valores mínimos requeridos que definan la calidad del biodiésel BD-100 (Tabla 1) y pruebas de identificación de los ésteres metílicos de ácidos grasos producto de la transesterificación mediante GCMS.

Tabla 1.

Límites permitidos de las principales propiedades físicas y químicas para el biodiésel

Propiedades	Normas ASTM D6751-02	Límites permitidos
Densidad 15.56 °C (g/mL)	D1298-99	0.860 – 0.900
Índice de acidez (mg KOH/g muestra)	D664	Máximo 0.5
Viscosidad a 40 °C (mm ² /s)	D 6751-91	1.9 – 6.0
Contenido de azufre (mg/kg)	D 6751-9	15 - 500
Punto de inflamabilidad (°C)	D 93	120
Índice de cetanos (min)	D613	47
Humedad (mg/L)	D6751	0.05
FAME mediante GC-MS	D6585 ISO 14103	Contenido de ésteres metílicos variable

Siguiendo lo indicado por la norma se determinó el rendimiento volumétrico porcentual (RV) del producto final por medio de la Ecuación 1, donde el $V_{Biodiésel}$ es el volumen de biodiésel obtenido y V_{Aceite} es el volumen de aceite utilizado como materia prima.

$$RV = \frac{V_{Biodiésel}}{V_{Aceite}} \times 100 \quad (1)$$

La densidad del biodiésel se evaluó mediante un picnómetro, el índice de acidez mediante titulación (Ecuación 2), esta ecuación relaciona la cantidad de miligramos de hidróxido de potasio necesaria para neutralizar los ácidos grasos libres presentes por gramo de aceite o grasa (Harbers and Nielsen, 2003). Si la materia prima presenta un índice de acidez alto (> 12 mg KOH/g de aceite) indica que hay una elevada degradación del aceite a causa de la exposición al calor, al oxígeno o al uso repetido, provocando que la reacción de transesterificación sea casi imposible (Pérez-Bravo *et al.*, 2022). Con el valor de IA se determinó el porcentaje de conversión que es la relación entre los índices de acidez del aceite utilizado como materia prima y del biocombustible (Ecuación 3), es decir, la conversión dela

materia prima indica la eficiencia con la que el aceite se transformó en biodiésel. Por último se evaluó el porcentaje de humedad mediante volatilización (Ecuación 4).

$$IA = \frac{\text{vol.en mL de KOH} \times M \text{ de KOH} \times PM \text{ de KOH}}{\text{masa de muestra (g)}} \times 100 \quad (2)$$

$$\% \text{ Conversión} = \frac{IA \text{ aceite} - IA \text{ biodiesel}}{IA \text{ aceite}} \times 100 \quad (3)$$

$$\% H y V = \frac{\text{Masa inicial} - \text{Masa final}}{\text{Masa inicial}} \times 100 \quad (4)$$

La correcta caracterización de los ésteres metílicos de ácidos grasos (FAME) como componentes del biodiésel han recibido una atención considerable en los últimos años debido a que representan un parámetro importante en la determinación de la calidad del producto. Esta caracterización se realizó mediante cromatografía de gases acoplada a un espectrómetro de masas (GC-MS), marca Shimadzu modelo QP2010 SE. Se utilizó una columna analítica capilar no polar SH-RXi-5HT (dimensiones: 30 m, DI: 0.25 mm, espesor de película: 0.25 μm). La energía de ionización fue de 70 eV y la rampa de temperatura que se utilizó inició a una 50 °C y terminó en 300 °C por un tiempo de 45 minutos. Además, se utilizaron: hexano grado HPLC como disolvente y como gas acarreador, helio.

La identificación de los compuestos se basó en la biblioteca de espectros de masas del Instituto Nacional de Normalización y Tecnología (National Institute of Standards and Technology) utilizando el software NIST MS Search 2.0. También, para corroborar la identidad de los diferentes FAME presentes, se utilizaron un set de estándares de biodiesel al 99.9 % de pureza, 17360 G.R. de Spectrum Quality Standards, Ltd.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Tabla 2 se presentan los resultados de los tres productos formulados. Los rendimientos volumétricos obtenidos son superiores al 70.0 %. El mayor rendimiento (94.0 %) se logró utilizando como materia prima 100 % de aceite virgen (BD-0) y el menor rendimiento corresponde al biodiesel producido con aceite reutilizado (BD-100), resultado esperado debido al contenido de impurezas de los aceites, afirmación realizada en el estudio: evaluación de la purificación de biodiésel (Mary Flor Césare, 2010).

El índice de acidez es un valor indicador que nos muestra el riesgo que la reacción de transesterificación no ocurra. Los resultados del índice de acidez confirman que la reacción se llevó a cabo de manera adecuada, ya que los valores obtenidos se encuentran por debajo del límite de 0.5 KOH/g aceite, indicado en la ASTM (ASTM D6751, 2023). Este valor está estrechamente relacionado con el porcentaje de conversión del biocombustible formulado.

El mayor porcentaje de conversión se obtuvo en el biodiésel producido a partir de aceite usado y el menor porcentaje de conversión se obtuvo en el biodiésel de aceite virgen. Este porcentaje mayor se debe a la presencia de ácidos grasos libres, generados durante el uso del aceite en la cocción de los alimentos. La presencia de una gran cantidad de ácidos grasos libres facilitan el proceso de transesterificación (Encinar, 2010). Cuando los aceites alcanzan altas temperaturas se generan reacciones de oxidación y polimerización térmica que altera la composición química. Este desdoblamiento de la cadena favorece la reacción de transesterificación (Pérez-Bravo *c.*, 2022). y por tanto se da una mayor conversión a diferencia del aceite virgen donde las estructuras de los ácidos grasos libres están más estables, lo que dificulta la conversión (Lafont, Páez & Torres, 2011).

Otro parámetro importante determinado fue la humedad como factor determinante en la calidad y rendimiento del biodiesel producido. El valor máximo permitido para este parámetro según la ASTM es de 0.05 %. Altas concentraciones de agua en el biodiésel pueden causar la corrosión del motor, e incluso la reproducción de microorganismos (Hoekman *et al.*, 2012). Los resultados de humedad obtenidos son mayores al máximo valor permitido, por lo cual en el futuro se debe optimizar este parámetro.

Tabla 2.

Principales propiedades fisicoquímicas de los productos obtenidos

Producto	BD-100 (Producto 1)	BD-50 (Producto 2)	BD-0 (Producto 3)
Rendimiento volumétrico (%)	74	86	94
Conversión (%)	96.47	93.89	85.54
Índice de acidez de la materia prima	8.78	2.95	1.73
Índice de acidez del biodiésel	0.31	0.18	0.20
Densidad	0.84	0.83	0.87
Humedad (%)	0.07	0.12	0.98

Los resultados obtenidos por GC-MS se relacionan directamente con la conversión de los triglicéridos a FAME, los tipos y proporciones de estos. La caracterización por GC-MS se realizaron a los productos BD-100 y BD-0, además del estándar utilizado como control.

Para el análisis de los biodiésels obtenidos, se utilizaron las mismas condiciones instrumentales (temperatura de inyección, rampa de temperatura y tiempo de análisis) aplicadas tanto para los analitos y el estándar de referencia.

En la Figura 5 se muestra el cromatograma del estándar certificado de biodiésel al 99 %. Los compuestos mayoritarios coinciden con los descritos en el certificado de análisis del estándar y con la base de datos de la biblioteca de espectros del NIST. Los picos con mayor área y representativos (ocho en total) son de los ésteres obtenidos del ácido palmítico (éster con C17) y de los oleicos (ésteres con C19) como se muestra en la Tabla 3.

Figura 5.

Cromatograma del estándar de biodiésel

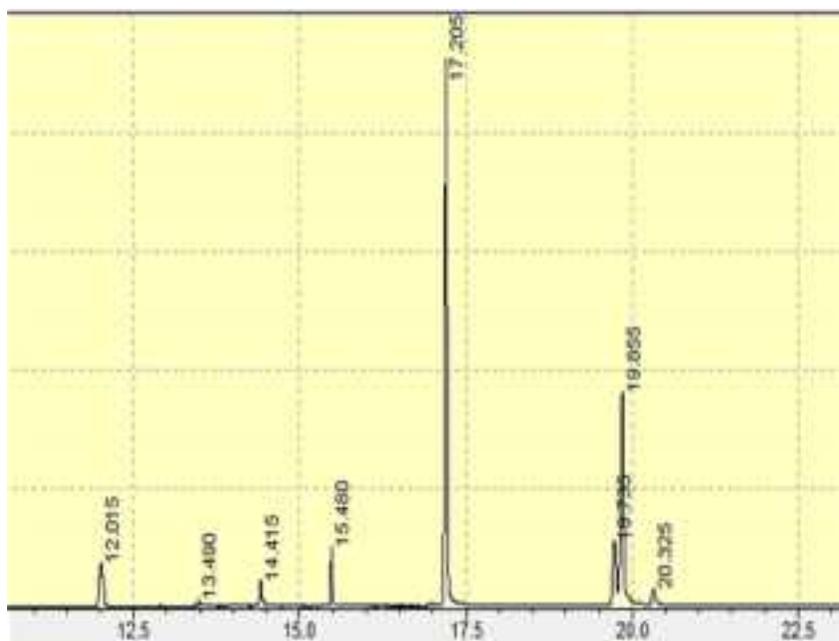


Tabla 3.
FAME identificados del estándar certificado de biodiésel

Tiempos de retención (min)	Ester metílicos de sus correspondientes ácidos grasos	Fórmula Molecular	Porcentaje en masa (%)
12.015	Éster metílico del ácido octanoico	C ₉ H ₁₈ O ₂	7.60
13.490	Éster metílico del ácido decanoico	C ₁₁ H ₂₀ O ₂	0.46
14.415	Éster metílico del ácido dodecanoico	C ₁₃ H ₂₆ O ₂	2.45
15.480	Éster metílico del ácido tetradecanoico	C ₁₅ H ₃₀ O ₂	4.39
17.205	Éster metílico del ácido hexadecanoico	C ₁₇ H ₃₂ O ₂	54.01
19.735	Éster metílico del ácido (Z, Z) -9,12-octadecadienoico	C ₁₉ H ₃₄ O ₂	3.98
19.855	Éster metílico del ácido 9-octadecenoico	C ₁₉ H ₃₆ O ₂	25.04
20.325	Éster metílico del ácido octadecanoico	C ₁₉ H ₃₈ O ₂	2.07

En la figura 6 y la tabla 4 se muestran los resultados de la caracterización del biodiésel BD-100 (proveniente de aceite 100 % reciclado). Se observa que los compuestos mayoritarios son los ésteres derivados del ácido 14-metil-pentadecanoico (éster con C17) y del ácido oleico (éster con C19), este último es muy común su presencia ya que la mayor cantidad de aceite comercial disponible en Panamá es el llamado “aceite vegetal mezcla” el cual está compuesto principalmente por aceite de soya.

Figura 6.
Cromatograma BD-100

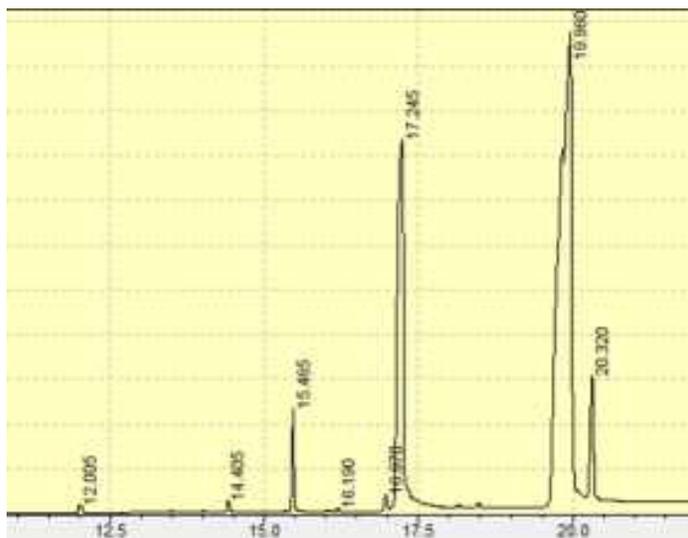


Tabla 4.
Principales FAME identificados del BD-100

Tiempos de retención (min)	Ester metílicos de sus correspondientes ácidos grasos	Fórmula Molecular	Porcentaje en masa (%)
12.010	Éster metílico del ácido octanoico	C ₉ H ₁₈ O ₂	0.37
14.405	Éster metílico del ácido dodecanoico	C ₁₃ H ₂₆ O ₂	0.89
15.465	Éster metílico del ácido tetradecanoico	C ₁₅ H ₃₀ O ₂	2.74
16.190	Éster metílico del ácido pentadecanoico	C ₁₆ H ₃₂ O ₂	0.37
16.970	Éster metílico del ácido 9-hexadecanoico	C ₁₇ H ₃₂ O ₂	0.91
17.245	Éster metílico del ácido 14-metil-pentadecanoico	C ₁₇ H ₃₄ O ₂	26.51
19.960	Éster metílico del ácido 9-octadecenoico	C ₁₉ H ₃₆ O ₂	62.25
20.320	Éster metílico del ácido 17-metil-octadecanoico	C ₂₀ H ₄₀ O ₂	5.96

En la Figura 7 se muestra los picos obtenidos por la caracterización del BD-0 obtenidos a partir de aceite vegetal virgen comercial. Es interesante observar (Tabla 5) que el biodiesel obtenido de este aceite presenta una menor variedad de FAME (cuatro) con respecto al BD-100 (ocho). Este resultado se debe principalmente a que para obtener el BD-0 solo se utilizó un tipo y marca de aceite vegetal virgen, en cambio el aceite utilizado para obtener el BD-100 procede de la mezcla de varias marcas y fuentes diferente, y que también ha sido sometido a altas temperaturas durante su uso lo cual pudo alterar en alguna medida la estructura química de los ésteres de glicerol originales. Los FAME más abundante en el BD-0 son los correspondientes a C17 y C19, de manera similar que el BD-100. Los ácidos grasos aquí identificados son similares a los identificados por Tefera en su estudio, optimización, caracterización y análisis GC de biodiésel a partir de semillas de algodón (Tesfaye Tefera *et al.*, 2024).

Figura 7.
Cromatograma BD-0

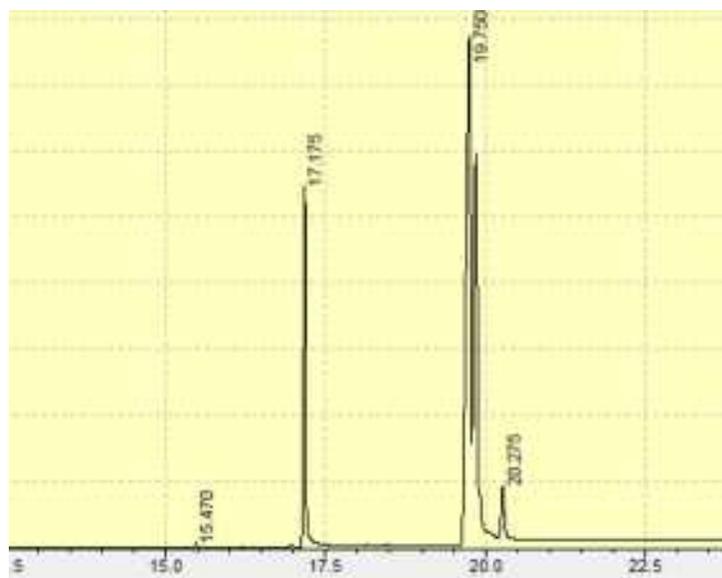


Tabla 5.
Principales FAME identificados en el BD-0

Tiempos de retención (min)	Ester metílicos de sus correspondientes ácidos grasos	Fórmula Molecular	Porcentaje en masa (%)
15.480	Éster metílico del ácido tetradecanoico	C ₁₅ H ₃₀ O ₂	0.17
17.175	Éster metílico del ácido 14-metil-pentadecanoico	C ₁₇ H ₃₄ O ₂	18.40
19.750	Éster metílico del ácido 8,11-octadecadienoico	C ₁₉ H ₃₄ O ₂	78.99
20.275	Éster metílico del ácido nonadecanoico	C ₂₀ H ₄₀ O ₂	2.44

CONCLUSIONES

Gran parte del trabajo en la producción y caracterización de biocombustibles comienza con el uso de materias primas "puras", en este estudio, intentamos maximizar los principios de sostenibilidad local sintetizando biocombustible a partir de aceite de cocina usado y grasa proveniente de nuestras cafeterías en el campus universitario; de este modo, sintetizamos con éxito biodiésel útil con una visión a futuro de crear la capacidad de eliminar el costo que implica para el campus el envío y procesamiento de estos residuos fuera de sus instalaciones.

El evaluar diferentes procesos para la obtención de biodiésel a partir de fuentes de energías renovables, relacionadas a la economía circular; sitúan este trabajo de investigación en una condición con elevado potencial para el desarrollo de esta práctica comercial en Panamá, dando así nuevas oportunidades de negocios a nivel industrial, aumentando la demanda de profesionales y técnicos nacionales idóneos en este rubro y propone una nueva alternativa para una mejor gestión de los procesos de manejo de residuos y desechos, cumpliendo así con varias de las ODS.

La realización de este proyecto generó información y *know-how* relevante en lo referente a la metodología para la correcta caracterización por GC-MS de los principales componentes (FAME) presentes en los biodiésel producidos.

El biodiésel obtenido en este proyecto a partir de aceite reutilizado cumple con los principales parámetros establecidos por las normas ASTM correspondientes, exceptuando los vinculados a niveles de humedad, la cual resultó ser un poco elevada. Se plantea en futuros trabajos mejorar este parámetro y realizar ensayos de rendimiento y eficiencia. Además, del potencial uso de la glicerina obtenida (principal producto secundario) como comonomero para su polimerización para así general biopolímeros con potenciales utilidades.

Finalmente, los datos y metodologías generadas y utilizadas prometen ser importantes al momento que se plantee realizar un escalado a nivel de planta piloto; Los resultados abren nuevas vías de investigación para la producción y caracterización, de modo que el biodiésel obtenido a partir del aceite de cocina usado en el campus pueda utilizarse de manera más económica para abastecer los vehículos diésel operados en el campus por el personal de operaciones, mantenimiento y seguridad, así como su potencial ahorro de costos para la universidad.

El estudio también evidencia la sencillez, rapidez y bajo costo al emplear la GC-MS al compararlos con otras metodologías comúnmente utilizadas para identificar ácidos grasos o sus derivados (FAME); siendo una de sus limitaciones los espectros no siempre contienen iones indicativos característicos estructurales (no siempre es posible determinar la forma definitiva en la posición de los dobles enlaces en la cadena alifática). Este estudio se centró en los iones más intensos para cada espectro de masa de los componentes de ácidos grasos obtenidos.

El análisis por GC-MS logró identificar componentes individuales en ambas muestras de biodiésel como los FAME, mostrando en la composición química en cada una de las muestras ensayadas la presencia de 8 tipos de FAME; siendo identificados mediante sus tiempos de retención y la comparación de sus espectros de masas con los estándares de la biblioteca del instrumental GC-MS.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASTM D6751 (2023) ‘Specification for Biodiesel Fuel Blend Stock (B100) for Middle Distillate Fuels’. West Conshohocken, PA: ASTM International. Available at: <https://doi.org/10.1520/D6751-20A>.
- Azman, N.S. *et al.* (2021) ‘Production of Biodiesel from Waste Cooking Oil via Deoxygenation Using Ni-Mo/Ac Catalyst’, *Processes* 2021, Vol. 9, Page 750, 9(5), p. 750. Available at: <https://doi.org/10.3390/PR9050750>.
- Babadi, A.A. *et al.* (2022) ‘Emerging technologies for biodiesel production: Processes, challenges, and opportunities’, *Biomass and Bioenergy*, 163, p. 106521. Available at: <https://doi.org/10.1016/J.BIOMBIOE.2022.106521>.
- BP (2022) ‘BP Statistical Review of World Energy 2022,(71st edition)’, <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2022-full-report.pdf>, pp. 1–60. Available at: <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2022-full-report.pdf>.
- Corral-Bobadilla, M. *et al.* (2024) ‘An artificial intelligence approach to model and optimize biodiesel production from waste cooking oil using life cycle assessment and market dynamics analysis’, *Energy*, 307, p. 132712. Available at: <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2024.132712>.
- Encinar, J.M, et al (2010) *Transesterification of rapeseed oil with methanol in the presence of various co solvents pdf free ebook download*. Available at: https://www.researchgate.net/publication/277149728_Transesterification_of_rapeseed_oil_with_methanol_in_the_presence_of_various_co-solvents (Accessed: 2 February 2025).
- Gebreslassie, M.G., Bahta, S.T. & Mihrete, A.S. (2023) ‘Development of alternative fuel for cement industries: The case of Messebo cement factory in Ethiopia’, *Waste Management Bulletin*, 1(3), pp. 58–70. Available at: <https://doi.org/10.1016/J.WMB.2023.07.003>.
- Harbers, L. & Nielsen, S. (2003) ‘El análisis de las cenizas’, *Análisis de los Alimentos*, pp. 121–132. Available at: https://www.editorialacribia.com/libro/analisis-de-los-alimentos_54086/ (Accessed: 17 September 2023).

- Hoekman, S.K. *et al.* (2012) ‘Review of biodiesel composition, properties, and specifications’, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(1), pp. 143–169. Available at: <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2011.07.143>.
- Kousoulidou, M. *et al.* (2012) ‘Impact of biodiesel application at various blending ratios on passenger cars of different fueling technologies’, *Fuel*, 98, pp. 88–94. Available at: <https://doi.org/10.1016/J.FUEL.2012.03.038>.
- Lafont, J.J., Páez, M.S. and Torres, Y.C. (2011) ‘Análisis Químico de Mezclas Biodiesel de Aceite de Cocina Usado y Diesel por Espectroscopia Infrarroja’, *Información tecnológica*, 22(4), pp. 35–42. Available at: <https://doi.org/10.4067/S0718-07642011000400005>.
- Leng, L. *et al.* (2018) ‘Biodiesel microemulsion upgrading and thermogravimetric study of bio-oil produced by liquefaction of different sludges’, *Energy*, 153, pp. 1061–1072. Available at: <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2018.04.087>.
- Liu, Z., Wang, J. and Nielsen, J. (2022) ‘Yeast synthetic biology advances biofuel production’, *Current Opinion in Microbiology*, 65, pp. 33–39. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.mib.2021.10.010>.
- Mary Flor Césare, L.C. (2010) ‘Redalyc. Evaluación de la purificación de biodiésel en la etapa final de producción’.
- Norma española UNE-EN 14214, 2013 (2013) ‘UNE-EN 14214:2013 A2+V2 Productos petrolíferos líquidos Ésteres metílicos de ácidos grasos (FAME) para motores diésel y equipos de calefacción Requisitos y métodos de ensayo’, p. 6.
- Norma española UNE-EN 14331 (2004) ‘UNE-EN 14331’.
- Norma Española UNE-EN ISO 5508 (1996) ‘Noma española’.
- ONU (2023) *Objetivos de Desarrollo Sostenible | Naciones Unidas en México, Onu*. United Nations. Available at: <https://www.un.org/es/common-agenda/sustainable-development-goals> (Accessed: 12 September 2023).
- Organización Meteorológica Mundial* | (2020). Available at: <https://public.wmo.int/en> (Accessed: 12 September 2023).

- Pérez-Bravo, S.G. *et al.* (2022) ‘Condiciones del proceso de transesterificación en la producción de biodiésel y sus distintos mecanismos de reacción’, *TIP. Revista especializada en ciencias químico-biológicas*, 25. Available at: <https://doi.org/10.22201/FESZ.23958723E.2022.481>.
- Progress, R.O.N., The, F. and Annual, U. (2022) ‘BIODIESEL & CO. 2021/2022’, pp. 1–60.
- Rodionova, M. V. *et al.* (2017) ‘Biofuel production: Challenges and opportunities’, *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(12), pp. 8450–8461. Available at: <https://doi.org/10.1016/J.IJHYDENE.2016.11.125>.
- Rupilius, W. and Ahmad, S. (2007) ‘Palm oil and palm kernel oil as raw materials for basic oleochemicals and biodiesel’, *European Journal of Lipid Science and Technology*, 109(4), pp. 433–439. Available at: <https://doi.org/10.1002/EJLT.200600291>.
- Shi, Z. *et al.* (2023) ‘Mechanism, performance and modification methods for NH₃-SCR catalysts: A review’, *Fuel*, 331, p. 125885. Available at: <https://doi.org/10.1016/J.FUEL.2022.125885>.
- Shirk, M. *et al.* (2017) ‘History of Significant Vehicle and Fuel Introductions in the United States’. Available at: <https://doi.org/10.2172/1408646>.
- Simshauser, P. (2023) ‘The 2022 energy crisis: Fuel poverty and the impact of policy interventions in Australia’s National Electricity Market’, *Energy Economics*, 121(March), p. 106660. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2023.106660>.
- Tan, D. *et al.* (2023) ‘Utilization of renewable and sustainable diesel/methanol/n-butanol (DMB) blends for reducing the engine emissions in a diesel engine with different pre-injection strategies’, *Energy*, 269, p. 126785. Available at: <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2023.126785>.
- Tesfaye Tefera, N. *et al.* (2024) ‘Optimization, characterization, and GC-MS analysis of CSOME produced using alkali catalyzed transesterification’, *Energy Conversion and Management: X*, 22, p. 100549. Available at: <https://doi.org/10.1016/J.ECMX.2024.100549>.
- Unidas, O. de las naciones (2022) *Las emisiones históricas del sector de la construcción, lo alejan de los objetivos de descarbonización*. Available at: <https://news.un.org/es/story/2022/11/1516722>.

- Verscheure, P. *et al.* (2023) 'Impact of environmental nitrogen pollution on pollen allergy: A scoping review', *Science of The Total Environment*, 893(June), p. 164801. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.164801>.
- Yousef, S. *et al.* (2023) 'Pyrolysis of cigarette butts as a sustainable strategy to recover triacetin for low-cost and efficient biodiesel production', *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 175, p. 106167. Available at: <https://doi.org/10.1016/J.JAAP.2023.106167>.
- Zahan, K.A. and Kano, M. (2018) 'Biodiesel production from palm oil, its by-products, and mill effluent: A review', *Energies*. Multidisciplinary Digital Publishing Institute, p. 2132. Available at: <https://doi.org/10.3390/en11082132>.



Evaluación trienal de la actividad de anidación de la tortuga marina *Chelonia mydas* en Playa Lagarto, Los Santos, Panamá

Triennial evaluation of the nesting activity of the sea turtle *Chelonia mydas* in Playa Lagarto, Los Santos, Panama

Jorge M. Castillo-Beitia

Universidad Autónoma de Chiriquí, Panamá.

jorge.castillo@unachi.ac.pa

<https://orcid.org/0009-0005-2414-1240>

Roberto Lombardo

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

roberto.lombardo@up.ac.pa

<https://orcid.org/0000-0002-0279-8621>

Eimy Suaza

Save The Turtles Venao, Panamá.

evsuaza@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0002-7877-2284>

Yerson Cruz-Mendivelso

University of Greifswald, Alemania.

yerson9311@hotmail.com

<https://orcid.org/0009-0006-5810-703X>

Santiago Jiménez-Arias

Organización Tortugas Pedasí, Panamá.

santiago.jimenez.arias1@gmail.com

<https://orcid.org/0009-0004-0813-5812>

Luisa F. López-Lozano

Organización Tortugas Pedasí, Panamá.

luisa.lopez3110@gmail.com

<https://orcid.org/0009-0003-5904-0330>

Deikel Saavedra

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

deikelsaavedra@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0002-3012-5459>

Fecha de recepción: 9 de agosto de 2024

Fecha de aceptación: 16 de abril 2025

DOI: <https://doi.org/10.48204/j.tecno.v27n2.a7659>

RESUMEN

Con el objetivo de evaluar la actividad de anidación de la tortuga verde (*Chelonia mydas*) durante tres años en Playa Lagarto, se realizaron monitoreos nocturnos desde mayo de 2021 a abril de 2024. Para ello se delimitaron nueve segmentos en la playa donde se registraron los siguientes datos para cada tortuga anidante: fecha, horario de anidación, número de actividad de anidación, datos biométricos, rastros, tipos de rastros, número de cama y zona de anidación. Se registraron 535 eventos de anidación, distribuidos en actividades de anidación falsa (41.12%), arrastres (26.36%), nidos efectivos (21.87%) y casos desconocidos (10.65%). *Chelonia mydas* anida con mayor frecuencia desde diciembre a abril y sale a anidar principalmente entre las 21:00 horas hasta las 23:00 horas. Se registraron 193 medidas de hembras anidantes, de las cuales se registró el promedio del largo curvo del caparazón (92.4 ± 7.12 cm) y el ancho curvo del caparazón promedio (86.1 ± 6.35 cm). Entre los 110 nidos observados, un 87.27% fueron exitosos y el 12.73% fueron saqueados. Este estudio contribuye a la focalización de esfuerzos de protección, para diseñar estrategias de conservación más efectivas, proteger hábitats esenciales y garantizar la conservación de las tortugas verdes.

PALABRAS CLAVE

Bermas, conservación, tortuga verde, nido, Panamá.

ABSTRACT

To evaluate the nesting activity of the green turtle (*Chelonia mydas*) over a three-year period at Playa Lagarto, nighttime monitoring was conducted from May 2021 to April 2024. The beach was divided into nine segments to determine whether the turtles preferentially use specific areas for nesting. For each turtle, data on date, nesting time, nesting activity number, biometric measurements, tracks, track types, nest count, and nesting segment were recorded. A total of 535 nesting events were documented, categorized as false nesting (41.12%), false crawls (26.36%), successful nests (21.87%), and unknown cases (10.65%). *Chelonia mydas* was found to nest most frequently between December and April, predominantly between 21:00 and 23:00 hours. Biometric data were recorded for 193 nesting females, with an average curved carapace length of 92.4 ± 7.12 cm and an average curved carapace width of 86.1 ± 6.35 cm. Among the 110 observed nests, 87.27% were successful, while 12.73% were poached. This study aids in optimizing conservation efforts by informing the design of effective strategies to protect essential habitats and ensure the long-term survival of green turtles.

KEYWORDS

Berms, conservation, green turtle, nest, Panama.

INTRODUCCIÓN

La tortuga *Chelonia mydas* (Linnaeus, 1758), al igual que todas las especies de tortugas marinas emplean diferentes hábitats en su periodo de vida (Kim *et al.*, 2024). Durante sus primeros años habitan zonas pelágicas, mientras que, en etapas juveniles se traslada a zonas costeras poco profundas y migran entre zonas de alimentación, lo cual puede ser influenciado por varios factores como: los cambios en la temperatura del agua (Kubis *et al.*, 2009; Limpus

& Chaloupka, 1997), las corrientes predominantes (Bass *et al.*, 2006) y las variaciones en la calidad del hábitat (Godley *et al.*, 2001). Por otra parte, su tendencia a la filopatría implica que los juveniles migran desde su sitio de origen hacia áreas de alimentación, regresando años después para reproducirse en el mismo lugar (Bowen *et al.*, 1992; Carr & Ogren, 1960). Finalmente, en el periodo de adultez alternan entre áreas de reproducción y alimentación (Bolten, 2003).

Se considera que esta especie es principalmente herbívora, ya que se alimenta de pastos marinos en su rango de distribución (Mortimer, 1982); sin embargo, también pueden alimentarse de algas (Bjorndal, 1980, 1985; Brand-Gardner *et al.*, 1999; Ferreira *et al.*, 2006; Forbes, 1994; Read, 1991). El número de la población de tortugas verdes es un indicador fiable del estado de conservación de los ecosistemas marinos, dado que desempeña un papel integral en las interacciones interespecíficas como presa, consumidor y competidor, a la vez que modifica la estructura física de los hábitats con su actividad de forrajeo (Chaloupka *et al.*, 2008).

Los cambios de hábitat durante el desarrollo suelen estar asociados con la maximización de las tasas de crecimiento, ya que las tortugas se desplazan hacia ambientes que favorecen una mayor ingesta de nutrientes (Bjorndal & Bolten, 1988; Koch *et al.*, 2007). La dinámica espacial y temporal de la distribución de estos nutrientes puede causar diferencias en las tasas de crecimiento, la medida correspondiente a la madurez sexual inicial y los ciclos de desarrollo gonadal a lo largo de la vida de las tortugas (Bjorndal & Bolten, 1988; Kubis *et al.*, 2009; Limpus & Chaloupka, 1997). En consecuencia, la longitud del caparazón varía entre los sitios de anidación de tortugas marinas: en México, de 65 a 117 cm; en Galápagos, entre 74 y 100 cm; y en el Golfo de California, de 59 a 107 cm (Márquez, 1990).

La anidación representa una etapa fundamental en el ciclo vital de las tortugas marinas (Rubiano, 2011). Una vez alcanzada su etapa reproductiva (10 y 50 años), estas se aparean y se desplazan a las playas para comenzar su período de desove, a lo largo de este proceso, es posible que las tortugas realicen tres o más ciclos de desove, un comportamiento denominado reanidación (Chacón *et al.*, 2008). Esta especie mayormente anida en las zonas costeras de Michoacán en México, la región del Pacífico de Costa Rica y las Islas Galápagos en Ecuador (Eckert *et al.*, 2000). En el Pacífico panameño, la temporada para *C. mydas* va de junio a enero (Lombardo & Saavedra, 2023).

Durante la anidación, que generalmente ocurre de noche, la hembra que ha sido fecundada emerge del mar y se desplaza en dirección a la playa (Márquez, 2000). Una vez cruzada la zona de marea alta, explora minuciosamente el sitio para realizar su nido, seguidamente, utiliza sus aletas delanteras para despejar el área y construir una cavidad somera (cama) en la arena. Luego, con las aletas caudales, cava una fosa conocida como cámara de incubación

donde deposita los huevos (Chacón *et al.*, 2008). Una vez completado el desove, recubre con arena los huevos y el nido lo camufla mediante un movimiento de "limpiaparabrisas" que realiza con sus aletas delanteras y finalmente regresa al mar (Bennett, 2018).

Las poblaciones de tortuga verde del Pacífico Oriental han experimentado declives significativos debido al aumento de la caza en los sitios de reproducción (Alvarado-Díaz *et al.*, 2001; Green & Ortiz, 1982; Seminoff *et al.*, 2002) y la captura incidental en pesquerías artesanales e industriales (Alvarado-Díaz y Figueroa, 1990; NMFS, 1998). Declives poblacionales recientes de *C. mydas* han sido reportados en Costa Rica (Restrepo *et al.* 2023). A pesar de los esfuerzos de conservación, seis de las siete especies de tortugas marinas siguen amenazadas a nivel mundial, lo que ha impulsado acciones de conservación y restauración por parte de países y organizaciones como la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (UICN) y la Convención sobre el Comercio Internacional de Especies Amenazadas de Fauna y Flora Silvestres (CITES) (Hilton-Taylor, 2000; Kim *et al.*, 2024).

Las poblaciones de la tortuga verde (*C. mydas*) están ampliamente distribuidas en los océanos Índico, Atlántico y Pacífico (Carr & Ogren, 1960). Sin embargo, muestran una considerable variación morfológica (cráneo, coloración indentaciones en bordes del caparazón) entre regiones (Bocourt, 1868; Kamezaki & Matsui, 1995). Esto llevó a la distinción de dos subespecies: *C. mydas mydas*, presente en los océanos Atlántico, Mediterráneo, Pacífico e Índico, y *C. mydas agassizii*, presente en el Pacífico oriental, la cual Bocourt (1868) describió originalmente como una especie distinta. A pesar de estas diferencias, los análisis de ADN mitocondrial (ADNmt) en diversas poblaciones de *Chelonia* no respaldan la distinción de la forma *agassizii* (Bowen *et al.*, 1992). Recientemente, se identificaron 11 linajes, entre los cuales el del Pacífico Central y Oriental es único, donde todas las poblaciones son monofiléticas (Jensen *et al.*, 2019). Esto significa que *a priori* se trata de una sola especie, *C. mydas*.

En Panamá, existen publicaciones sobre la actividad reproductiva, parámetros demográficos y biometría de tortugas marinas (Castillero *et al.*, 2024; Garcés *et al.*, 2020; Lombardo & Saavedra, 2023), que podrían ser utilizados para evaluar tendencias a largo plazo sobre las poblaciones de *C. mydas* e informar esfuerzos de conservación. La actividad de anidación y el éxito de los nidos son factores fundamentales para evaluar la natalidad y el contexto demográfico; incluso, su análisis a largo plazo permite identificar amenazas específicas (Chaloupka *et al.*, 2008; Kim *et al.*, 2024; Whiting *et al.*, 2020). Por lo tanto, este estudio tuvo como objetivo evaluar la actividad de anidación y las variables biométricas de *C. mydas* en Playa Lagarto, Pedasí, Los Santos.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

Playa Lagarto se localiza en el Refugio de Vida Silvestre Pablo Arturo Barrios, en el distrito de Pedasí, provincia de Los Santos. El clima de Los Santos se clasifica como sabana tropical (Aw) según el sistema Köppen, caracterizado por dos estaciones principales: húmeda y seca. Las temperaturas suelen oscilar alrededor de 28°C, con una precipitación anual promedio de 1100 mm, aproximadamente (Peel *et al.* 2007).

El refugio de vida silvestre fue designado como zona protegida por medio de la resolución AG0313-2009, el 4 de mayo de 2009. Este abarca una extensión total de 137,99 km², de los cuales 136,06 km² corresponden a áreas marinas. El área terrestre consiste de una franja costera que es vulnerable al crecimiento de comunidades y turismo (Pinto & Yee, 2011). Los límites del área protegida están definidos al norte con el río Purio y el Golfo de Panamá (845205.27 N; 602918.71 W), al este con el Refugio de Vida Silvestre Isla Iguana (845220.72 N; 603546.06 W), al sur con Punta Mala y el Océano Pacífico (845367.06 N; 609823.77 W), y al oeste por los corregimientos de Purio, Mensabé y Pedasí (843836.08 N; 609842.48 W) (Garcés *et al.* 2020) (Fig. 1).

Muestreo en campo

De mayo de 2021 a abril de 2024, se realizó un monitoreo de la actividad de anidación de *C. mydas* en Playa Lagarto. La intensidad del monitoreo varió a lo largo de la temporada de anidación en función de la actividad registrada en la playa. Entre diciembre y abril, se llevaron a cabo monitoreos nocturnos con una duración de cuatro horas, tanto antes como después de la marea alta, acumulando un total mensual de 160 horas de observación. En contraste, durante el periodo de mayo a junio, el esfuerzo de monitoreo se redujo a censos diurnos de una hora debido a la escasa actividad de las tortugas. Para facilitar el monitoreo, la playa se dividió en segmentos señalizados con nueve postes guía, marcados desde la letra P1 hasta la P8 y el poste LG (Playa La Garita; Fig. 1), con una separación de 200 metros cada uno, con el objetivo de detectar posibles preferencias de anidación (Chacón *et al.*, 2008). Cuando se encontraron tortugas anidando, se midió el largo curvo del caparazón (LCC) y el ancho curvo del caparazón (ACC). Si las tortugas ya estaban marcadas, se registró el código de la placa; de lo contrario, se les colocó una placa metálica tipo Inconel en la aleta anterior derecha, entre la segunda y tercera escama para identificar posibles eventos de reanidación.

Figura 1.

*Imágenes satelitales del contexto geográfico y ubicación de los postes de referencia para la actividad de anidación de *Chelonia mydas* en Playa Lagarto, Pedasí, Los Santos. Imagen de Google Earth Pro, Airbus 2024 (WGS-84). Escalas: 100 km en el recuadro superior e inferior, 300 m.*



Se registró el tipo de rastro, la ubicación de la zona de anidación en el perfil de la playa (baja, media o alta) en relación con el poste guía más cercano, así como el tipo de rastro, si el intento de anidación fue fallido o no y estado del nido. Una vez se determinó el tipo de rastro como verdadero, es decir hubo un nido, se clasificó el estado del mismo en función de las características descritas en el Cuadro 1.

Tabla 1.

Descripción de las variables de anidación registradas para Chelonia mydas en Playa Lagarto, Pedasí, Los Santos.

Variable	Categoría	Descripción
Tipo de rastro	Verdadero	Hubo construcción de la cama y nido.
	Falso	Esfuerzo de anidación incompleto.
	Desconocido	No se logró determinar si la tortuga logró anidar
Estado del nido	<i>In situ</i>	El nido quedó ubicado donde la tortuga desovó.
	Reubicado	El nido fue trasladado en un vivero.
	Saqueado	El nido fue intervenido por saqueadores.
	Depredado	Los huevos fueron consumidos por animales silvestres o domésticos.
Intento fallido	No puso	La tortuga intentó hacer cama, pero no logró terminarla o realizó la cama sin desovar.
	Arrastre	Regresó al mar (rastro en “U”) sin intentar anidar.

En los casos en que solo se encontraron rastros, se midió el ancho de la huella externa (HE) y también se registraron datos sobre la fase lunar y el estado de la marea (Bolten, 2000; Rueda-Almonacid *et al.*, 2007; Chacón *et al.*, 2008; Brenes *et al.*, 2015). Se utilizaron los datos de temperatura media mensual (enero a diciembre) del Instituto de Meteorología e Hidrología de Panamá (IMHPA), obtenidos de la estación más cercana a la provincia de Los Santos. Se calculó el éxito de anidación de las temporadas, entre el número de nidos con la actividad de anidación en su temporada. También entre el número de nidos y la actividad de anidación de cada rango de tamaño de las tortugas. Para calcular el éxito de anidación se utilizó la siguiente fórmula:

$$\text{Éxito de anidación} = \frac{\text{Número de nidos}}{\text{Número de actividad de anidación}} \times 100$$

Análisis estadístico

Se utilizaron pruebas de Chi-cuadrado de bondad de ajuste para analizar las proporciones de actividad de anidación por las horas, los años, los nidos por zona (alta, media y baja), estado

de la marea, la actividad de anidación por mes, el número de nidos por segmentos en la playa y el éxito de anidación según el tamaño de la tortuga. Dado que los datos no cumplieron con los supuestos de normalidad y homocedasticidad, se optó por utilizar la prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis y se evaluó la actividad de anidación según la fase lunar y el estado del nido. Además, se empleó la misma prueba para determinar en qué mes se registraba el mayor número de nidos y el tamaño de las tortugas por año. Estos análisis se realizaron utilizando el programa estadístico SPSS v19 y los gráficos fueron realizados con Jamovi 2.5.6.

RESULTADOS

Actividad de anidación

Para las tres temporadas la actividad de anidación fue de 535 eventos, distribuidos en anidación falsa (41.12%), arrastres (26.36%), nidos efectivos (21.87%) y casos desconocidos (10.65%). Las tortugas *C. mydas* en Playa Lagarto anidan desde enero hasta diciembre, siendo la temporada alta desde diciembre hasta abril con 491 actividades de anidación. Febrero fue el mes con mayor actividad de anidación con 146, seguido del mes de marzo con 136. La temporada baja fue durante los meses de mayo a noviembre con 44 actividades de anidación. Hubo diferencia significativa en la actividad de anidación entre los meses de los años estudiados ($X^2 = 373$, $gl = 11$, $p < 0.001$, Fig. 2.A). La temporada baja fue la que presentó el mayor éxito de anidación (34.09%), mientras que la temporada alta tuvo el menor (17.31 %). El mes de marzo fue el que presentó el mayor porcentaje de eventos sin anidación (13.83%), seguido del mes de febrero (10.65%).

Los eventos de anidación se concentraron entre las 19:00:00 hasta las 7:00:00 horas y la mayor frecuencia de anidación se concentró desde las 21:00:00 hasta las 22:59:59 horas, con 191 eventos de anidación. Los horarios donde hubo menor actividad fueron desde las 3:00:00 hasta las 7:00:00 horas con 93 eventos; la diferencia entre estas proporciones fue significativa ($X^2 = 176$, $gl = 5$, $p < 0.001$, Fig. 2.B).

Durante los años 2021 y 2022 hubo la mayor frecuencia de anidación (219), la cual disminuyó en los dos periodos siguientes (2022-2023 = 162; 2023-2024 = 154). Se encontraron diferencias significativas en la actividad de anidación entre los años ($X^2 = 23.5$, $gl = 2$, $p = 0.001$, Fig. 2.C). A partir del periodo 2021-2022 la temperatura ambiental fue aumentando en los meses de febrero a marzo (mayor número de eventos falsos), tendencia que estuvo acompañada por una disminución en la actividad de anidación (Fig. 2.D), además de observar que el periodo de 2023 a 2024 fue el que presentó la mayor temperatura ambiental (Fig. 3.A). Por otro lado, las tortugas verdes mientras anidan pueden realizar varias camas, durante los años estudiados se obtuvo un promedio de 2.04 ± 1.16 camas/ind. (1-7 camas/ind.).

De acuerdo con las fases lunares, la mayor actividad de anidación durante el periodo de 2021-2022 fue durante gibosa creciente, en el 2022-2023 fue en gibosa menguante y en el 2023-2024 fue en gibosa creciente. Se determinó diferencias significativas entre la actividad de anidación con las fases lunares ($H = 36.3$, $gl = 7$, $p = 0.0001$). Las tortugas verdes fueron más activas en la luna gibosa creciente, seguido de la luna menguante y se reportó menor actividad en luna llena y nueva (Fig. 3.C). Asimismo, se determinó diferencias significativas entre la actividad de anidación con el estado de la marea ($X^2 = 206$, $gl = 5$, $p < 0.001$). Estas anidaron con mayor frecuencia en marea media subiendo, alta bajando y alta (Fig. 3.D).

Biometría y éxito de anidación

Se registraron 193 medidas de hembras durante las tres temporadas de anidación, sin poder determinar si se trataba de individuos diferentes. Las mediciones se distribuyeron en 85 tortugas del periodo de 2021 a 2022, 53 en el periodo de 2022 a 2023 y 55 en el periodo de 2023 a 2024. El LCC promedio fue de 92.4 ± 7.12 cm (70-109 cm), el ACC promedio fue de 86.1 ± 6.35 cm (63.1-97 cm) y el tamaño promedio de la HE fue de 97.0 ± 10.3 cm (77-120 cm). No se encontró diferencias significativas en el LCC, el ACC y la HE durante los años estudiados, indicando que las tortugas durante el periodo estudiado fueron de tamaños similares ($H = 1.232$, $gl = 2$, $p = 0.540$; $H = 0.300$, $gl = 2$, $p = 0.861$; $H = 2.13$, $gl = 2$, $p = 0.344$; respectivamente). Sin embargo, las tortugas de menor talla entre el rango de LCC de 70.01 a 80.01 (3.84%) y 80.01 a 90 (33.33%) cm tuvieron mayor éxito de anidación, en contraste con las tortugas de mayor talla, con medidas de LCC, entre el rango de 90.01 a 100 (43.58%) y 100.01 a 120 (19.23%) cm ($X^2 = 10.2$, $gl = 3$, $p = 0.0017$, Fig 3.B).

Reanidación y selección de sitios de anidación

Se marcaron 26 tortugas en las temporadas de anidación de 2022 a 2024, de las cuales 19 fueron reanidantes, con un intervalo promedio de 18.9 ± 6.32 días. Las tortugas con la placa PY257 (LCC = 100.3; ACC = 93 cm) y PY274 (LCC = 102; ACC = 95 cm) reanidaron cuatro veces, con un promedio de 17.75 ± 2.52 días y 16.75 ± 2.34 días, respectivamente. Entre los 110 nidos observados, 96 resultaron exitosos, representando un 87.27%, estos se distribuyen en 48 en 2021-2022, 38 en 2022-2023 y 24 en 2023-2024. Sin embargo, durante los años de estudio el 12.73 % fueron saqueados por los extractores furtivos. En el periodo de 2023 a 2024, no se registró actividad de saqueo de huevos de tortugas verdes, a diferencia de los años anteriores en los que sí se observó. Los intentos de anidación fallidos (no puso y arrastre) ocurrieron con mayor frecuencia que los exitosos ($H = 18.7$, $gl = 5$, $p = 0.002$, Fig 4.A).

Se observó que el mayor número de nidos fue en el mes de febrero (33 nidos), el cual presenta la mayor variación, y el mes de diciembre fue el segundo mes con mayor número de nidos (22 nidos) (Fig. 4.B). Además, las tortugas anidaron con mayor frecuencia en el segmento

P5 (44 nidos), seguido del P6 (16 nidos) y luego P4 (14 nidos) (Fig. 4.C). El mayor número de nidos se ubicaron en la zona alta de la playa (94 nidos), mientras que en la zona baja no

hubo desove (Fig. 4.D). Existen diferencias significativas en el número de nidos por mes, los segmentos en la playa y zona de puesta ($H = 23.1$, $gl = 11$, $p = 0.017$; $X^2 = 84.4$, $gl = 8$, $p = 0.001$; $H = 28.1$, $gl = 2$, $p < 0.001$, respectivamente).

Figura 2.

Actividad de anidación de Chelonia mydas respecto a variables temporales y factores abióticos en Playa Lagarto, Los Santos, Panamá. A. Actividad de anidación por mes, B. Horarios de actividades de anidación, C. Actividad de anidación por años. D. Temperatura ambiental anual del 2021-2024.

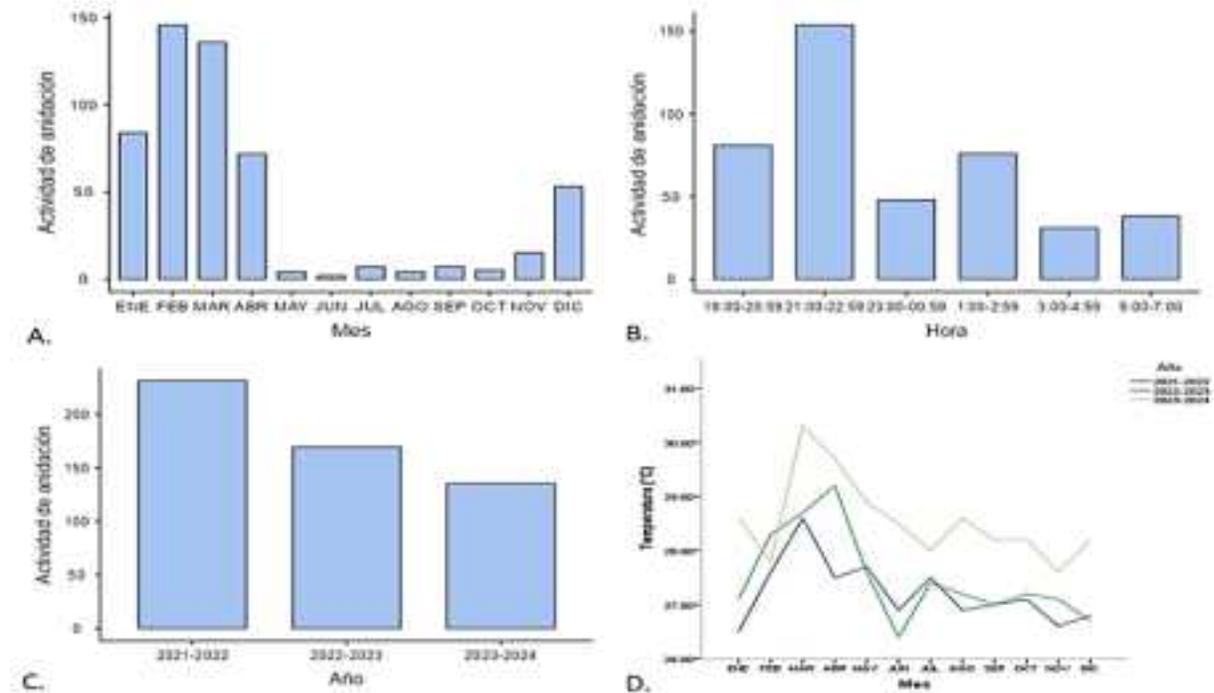


Figura 3.

Variables que influyen la actividad de anidación de Chelonia mydas en Playa Lagarto, Los Santos, Panamá. A. Influencia de la temperatura media ambiental (°C) en la actividad media de anidación, B. Éxito de anidación según la biometría de la tortuga, C. Actividad de anidación de acuerdo a la fase lunar, D. Actividad de anidación según el estado de la marea.

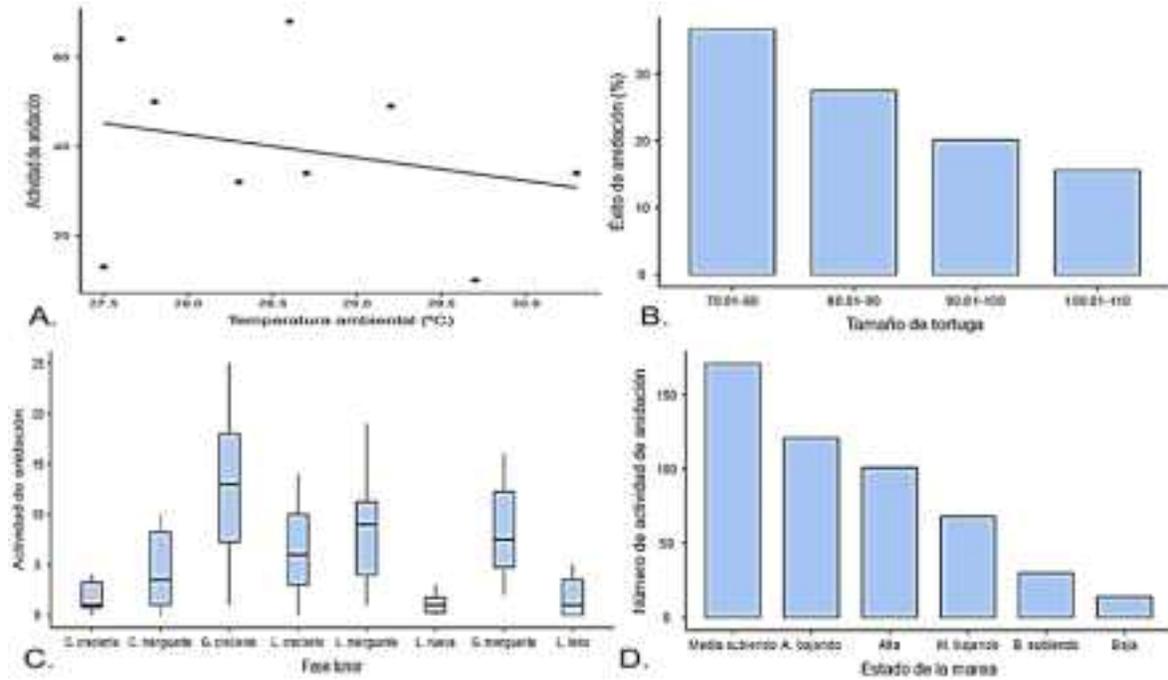
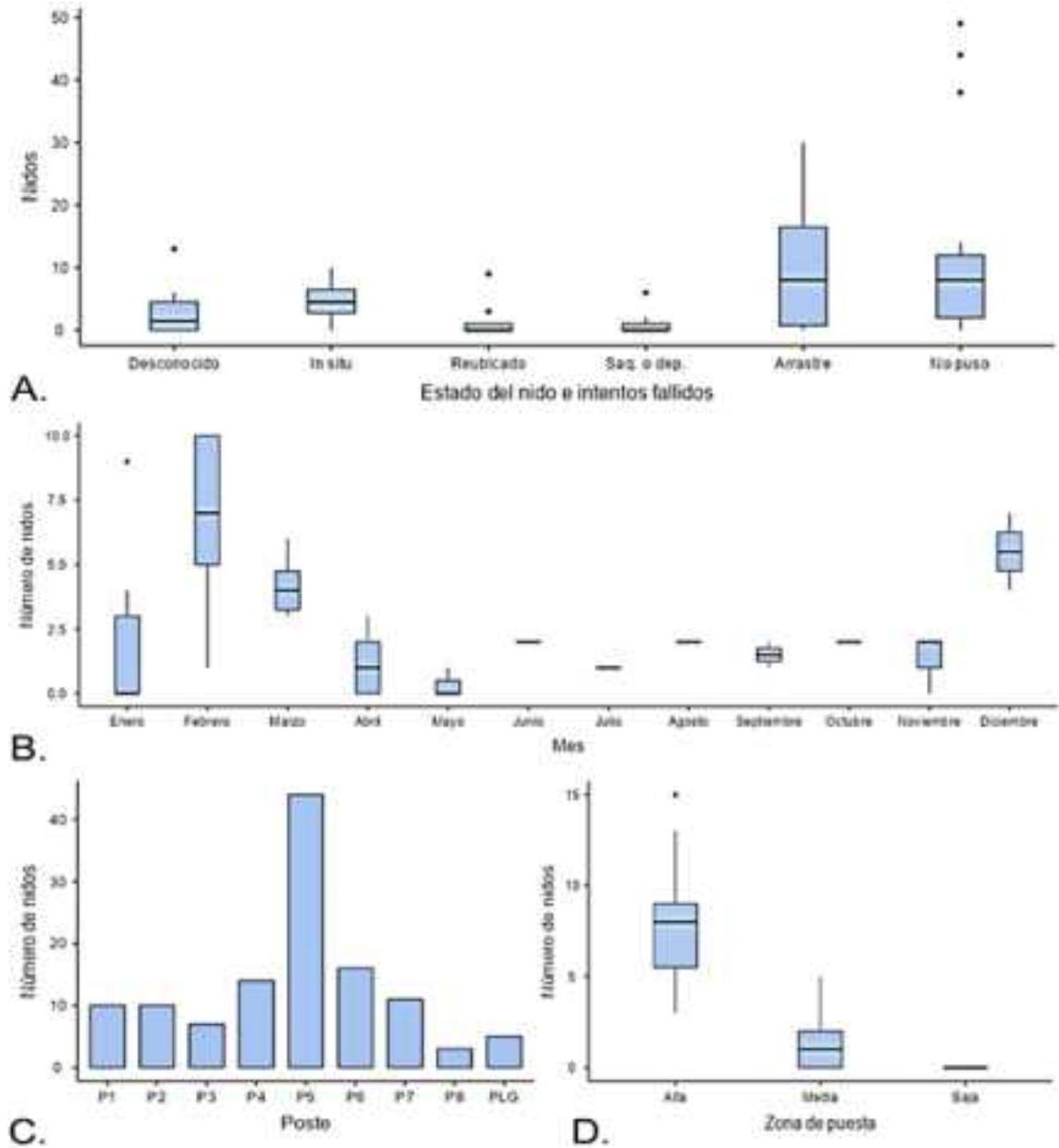


Figura 4.

Variables asociadas a parámetros de natalidad en Chelonia mydas en Playa Lagarto, Pedasí, Los Santos, Panamá. A. Actividad de anidación de acuerdo al estado del nido, B. Número de nidos de acuerdo al mes, C. Número de nidos en cada segmento de la playa, D. Número de nidos en cada zona de puesta en la playa.



DISCUSIÓN

Garcés *et al.* (2020) reportaron un total de 4 nidos entre agosto de 2016 y febrero de 2017, en Playa Lagarto, cifra considerablemente menor que la observada en nuestro estudio para esos mismos meses, en los que se registró un promedio anual de 28 nidos. Por su parte, Lombardo y Saavedra (2023) documentaron 25 nidos entre junio de 2021 y enero de 2022, mientras que nuestro estudio reportó un promedio de 29 nidos por año en ese mismo periodo. De igual forma, López & Arias (2024) informaron 32 nidos entre diciembre de 2022 y marzo de 2023, cifra muy similar a la registrada en nuestro estudio, con 31 nidos en promedio anual durante esos meses. Nuestro trabajo documentó una mayor actividad de anidación en la mayoría de los periodos analizados, lo que podría reflejar un incremento reciente en la utilización de la playa o diferencias en el esfuerzo de monitoreo entre estudios, condiciones ambientales locales, o a la fidelidad de las tortugas a playas específicas. En comparación con Castellero *et al.* (2023), en Playa Morrillo, se reportaron 45 nidos entre julio y noviembre, mientras que en nuestro estudio se registró un promedio anual de 36 nidos para estas mismas fechas.

Nuestros resultados sugieren que no todos los estudios previamente citados son directamente comparables, quizás debido a diferencias metodológicas, ya que el análisis de los datos en el presente estudio demuestra una disminución en la actividad de anidación de las tortugas verdes a lo largo de los años. Este patrón, junto con la prevalencia de anidaciones fallidas y el incremento de la temperatura ambiental, sugiere que las condiciones necesarias para una anidación efectiva en la playa están cambiando. Contrario a lo esperado, las tortugas de menor tamaño tuvieron un mayor éxito de anidación en comparación con las de mayor tamaño. Este resultado posiblemente se deba a que, al ser más jóvenes y tener menor cantidad de huevos para depositar (Le Gouvello *et al.*, 2020), el periodo necesario para finalizar el proceso de anidación sea menor, lo que reduce la probabilidad de ser interrumpidas. Dado que existe una correlación positiva entre el tamaño de las tortugas y la cantidad de huevos por nidada (Le Gouvello *et al.* 2020), las tortugas grandes contribuyen con un mayor número de reclutas a la población (Johnson & Ehrhart, 1996). Esto implica que, aunque los individuos de menor talla presenten un mayor éxito de anidación, los cambios en la estructura de tallas de las hembras anidantes podrían tener consecuencias demográficas negativas.

En la Isla de Penang, Malasia, se observó que la cantidad de nidos tiende a ser mayor durante los meses de marzo a julio, aunque también se registró una cantidad relativamente alta de nidos durante los meses de agosto a febrero debido a temperaturas más bajas que homogenizan la distribución temporal de los nidos (Salleh *et al.*, 2020). Aunque el pico de anidación de las tortugas verdes generalmente ocurre en febrero, hubo una cantidad significativa de nidos en diciembre y marzo, especialmente en los meses donde se reportaron las temperaturas más bajas, lo cual puede favorecer la anidación. Esto sugiere que, aunque

diciembre y marzo no son los meses de mayor actividad, sigue siendo un período importante para la anidación de las tortugas verdes en Playa Lagarto.

Bruno *et al.*, (2020) explican que temperaturas elevadas alteran las fuentes de nutrición disponibles para las tortugas, lo que a su vez afecta la cantidad de tortugas hembra que llegan a ser reproductivamente activas cada año. Esto podría explicar, al menos en parte, por qué disminuyó la actividad de anidación en el periodo 2023-2024, donde se registraron las temperaturas más altas. Más aún, las investigaciones señalan que la mayor actividad se observa en los meses de octubre a diciembre (temporada lluviosa), hasta el comienzo de la temporada seca, con un pico entre noviembre y enero (Peñalba & Ríos, 2013). Comparado con nuestro estudio, la mayor frecuencia de anidación se observó en el mes de febrero; sin embargo, los períodos de mayor actividad de anidación son similares. Aunque ambos enfoques destacan la relevancia de la transición entre la temporada lluviosa y la seca, estos difieren levemente en la precisión de los meses de mayor actividad de anidación. En Lanyu, Taiwán, las tortugas verdes anidan todo el año, principalmente en temporada de veranos cálidos y secos, afectando el comportamiento de anidación por las condiciones ambientales y las interferencias humanas (Cheng *et al.*, 2009). En ambas latitudes, el incremento de la anidación en las tortugas verdes parece estar relacionado con la mayor disponibilidad de alimento. Aunque el alcance de nuestro estudio es limitado en este sentido, Valverde-Cantillo (2019) reportó un incremento en la anidación en febrero en el Pacífico Oriental, coincidiendo con mayores concentraciones de clorofila- β en la zona de alimentación respecto a la temporada anterior. Este periodo también coincide con afloramiento en el Pacífico panameño durante época seca, con termoclina somera, bajas temperaturas y altas concentraciones de clorofila (D'croz & O'dea, 2007). Esto podría explicar el incremento de eventos de anidación durante febrero en nuestro estudio, asociado a mayor productividad.

Por otra parte, el estudio de Veelenturf *et al.* (2021) subraya que las playas de anidación de *C. mydas* se caracterizan por presentar condiciones tales como, un gradiente de elevación variable que posibilita la ubicación de nidos en zonas adecuadas por encima de la línea de marea alta, cerca de la vegetación. Otros factores importantes, que afectan la construcción y mortalidad de los nidos por colapso, incluyen la temperatura, humedad, tamaño del grano de arena y el ancho de la playa (Mortimer, 1990; Pertiwi & Lathifah, 2021). Playa Lagarto cuenta con estas condiciones (Lombardo & Saavedra, 2023); sin embargo, la temperatura ambiental fue mayor en el último año de estudio y posiblemente esto causó resequedad de la arena. Este fenómeno fue confirmado directamente a partir de observaciones en las que la arena de la cámara excavada por las tortugas colapsó, impidiendo la formación de los nidos. Este evento se registró especialmente en los meses de marzo y abril de 2024.

El aumento de la temperatura puede afectar la actividad reproductiva de las tortugas, ya que observaciones de nuestro estudio indican que, en condiciones óptimas, las tortugas verdes

pueden tardar menos tiempo en anidar (Lindborg *et al.* 2019; Mortimer, 1990). El éxito de excavación de los nidos por parte de las hembras está fuertemente ligado a la compactación del sustrato y la cobertura vegetal, que son condiciones claves, que influyen significativamente en las áreas de anidación (Chen *et al.* 2007). Sin embargo, en playas con arena reseca y condiciones extremas, este proceso puede extenderse considerablemente. En efecto, se observó casos donde las tortugas realizaron entre cuatro a cinco camas y demoraron varias horas en anidar; en un caso particular, el proceso fue de siete horas, sin éxito, debido a que la arena colapsaba sobre cada cámara. La prolongación del tiempo de anidación y la realización de múltiples camas indican que las tortugas están enfrentando dificultades para encontrar sitios adecuados para sus nidos. Esto es consistente con lo reportado previamente por Lombardo & Saavedra (2023), para nuestro sitio de estudio, quienes indican que la degradación de las condiciones de la playa tiene impacto negativo sobre la anidación. Así mismo, estudios de otros países, señalan que el aumento de las temperaturas también afecta negativamente la anidación de las tortugas verdes (Chen *et al.*, 2007; Houtan & Bass, 2007; Miller, 1997; Mortimer, 1990).

En contraste, la cobertura vegetal influye positivamente en el número de nidos y el éxito de anidación, observándose mayores densidades de nidos en áreas con vegetación (Chen *et al.*, 2007; Mortimer, 1990). La vegetación también influye en las condiciones internas del nido, como la temperatura y la humedad, que son cruciales para el desarrollo embrionario y el éxito en la emergencia de las crías. Asimismo, las tortugas verdes prefieren anidar en elevaciones por encima de la marea alta, lo que mejora la supervivencia de la nidada al evitar inundaciones (Limpus *et al.*, 2021). La selección de los sitios de anidación óptimos tiene un impacto directo en el éxito reproductivo de las tortugas, ya que los nidos más fríos, situados cerca de la vegetación, producen crías más grandes, las cuales pueden tener mejores tasas de supervivencia debido a una dispersión más rápida y una mayor capacidad para evadir a los depredadores (Guerra *et al.*, 2021; Le Gouvello *et al.*, 2020; Patricio *et al.*, 2018). En este contexto, el hecho que la mayor frecuencia de anidamiento ocurrió en el segmento P5 de la playa sugiere que las condiciones óptimas están focalizadas en un área relativamente pequeña respecto al área total de la playa.

Un estudio sobre cómo el fenómeno “El Niño-Oscilación del Sur” y la temperatura del océano influyen en la reproducción de tortugas verdes en Tortuguero, Costa Rica, revela que las anomalías de temperatura cálida en la superficie del mar durante los inviernos del hemisferio norte aumentan el número de puestas de tortugas verdes. Sin embargo, se observa una reducción en las puestas dos años después de los eventos de El Niño (Bruno *et al.*, 2020). Las fluctuaciones térmicas podrían dar origen a la variabilidad en la producción de nidadas por individuo o al intervalo de reanidación, lo que resalta la importancia de la consistencia en la temperatura para la estabilidad de las poblaciones de tortugas. El intervalo promedio de reanidaciones (18.9 días) en este estudio es mayor que los intervalos reportados en estudios

previos: 12.5 días en Tortuguero (& Ogren, 1960), 13.4 días en Surinam (Schulz, 1975), 14.5 días en Isla Ascensión (Carr, 1975) y en el Pacífico, de 12 a 15 días (Amorocho *et al.*, 2015). Sin embargo, las variaciones entre individuos son consistentes con la falta de tendencias significativas en las variaciones de intervalos observadas en estudios anteriores; esto sugiere que, aunque los intervalos promedio varían entre diferentes estudios y ubicaciones, la variabilidad entre individuos dentro de cada estudio es una característica común (Carr & Ogren, 1960).

En playa Lagarto, las tortugas, en general, afrontan amenazas de orden antropogénico. Según Pinto & Yee (2011), la porción de tierra firme frente al litoral consiste en una estrecha franja costera altamente susceptible al desarrollo de comunidades y proyectos turísticos asociados al distrito. Tal como se observa en la figura 1, la zona de estudio presenta zonas intervenidas por la agricultura y casas ubicadas frente a la playa donde anidan las tortugas, aunque sin éxito. Esto sugiere que el desarrollo inmobiliario (ruido, luces, entre otros) podría estar afectando negativamente su actividad de anidación (Witherington, 1992).

Vera y Buitrago, (2012) encontraron que las horas con mayor cantidad de eventos de anidación ocurren entre las 21:00 y las 02:00, con 42% de las tortugas registradas entre las 22:00 y las 23:00, similar a lo encontrado en nuestro estudio. Asimismo, los horarios de mayor anidación coinciden con los resultados de investigaciones anteriores realizadas en Isla de Aves (Venezuela) durante las décadas de 1970 y 1980, así como estudios posteriores (Gremone & Gómez, 1983; Narciso & Solé, 1999; Solé & Medina, 1989; Witherington, 1992). Este patrón y su consistencia sugieren que los horarios de actividad de anidación tienen naturaleza adaptativa que maximiza las probabilidades de éxito reproductivo. Adicionalmente, Azanza *et al.* (2023) encontraron que las tortugas pueden verse influenciadas por los cambios lunares, al igual que en nuestro estudio. Durante la fase de luna llena y luna nueva, se presentan las mareas más altas y ocurre una disminución en la actividad. Sin embargo, en la luna llena, es más baja la actividad, ya que la luna permanece brillante durante toda la noche, lo que incrementa el riesgo de depredación (Cháves, 1994). Estos resultados pueden relacionarse con nuestro estudio, donde las tortugas salen mayormente en la fase lunar gibosa creciente y menguante, pero anidan en pocas ocasiones durante la luna nueva y llena. Esto implica que las tortugas son especialmente vulnerables a la contaminación lumínica, situación latente en el área de estudio, por la cercanía de proyectos inmobiliarios (Lombardo & Saavedra, 2023).

El saqueo de nidos fue disminuyendo con el paso de los años, y en el periodo del 2023-2024 no hubo saqueos. Este cambio puede deberse al esfuerzo constante de monitoreo en la playa por parte la fundación Tortugas Pedasí, investigadores, observadores, voluntarios y otros colaboradores. Investigaciones efectuadas por Poti *et al.*, (2021), indican que la ingesta de huevos de tortuga ha disminuido desde la implementación de medidas de protección, lo que ha provocado que los huevos sean de difícil acceso.

Otro factor que afecta la actividad de anidación es la erosión costera, ya que cambios en los procesos de sedimentación, dan lugar a barreras naturales que se forman paralelamente a la playa con pendientes abruptas, conocidas como bermas (Payo *et al.*, 2008; Rivera-Solís, 2021). Con respecto a los segmentos en la playa, las tortugas anidaron mayormente en el P4, P5 y P6. Esto puede deberse a que en estas zonas hay bermas de menor altura en comparación con las de otros segmentos. Estas pendientes pueden perjudicar el proceso de desove de las tortugas marinas, debido a que limitan el paso de la tortuga en las zonas de anidación (Sunamura, 1989; Recaséns *et al.*, 2010). Según Lombardo y Saavedra (2023), es probable que estas barreras naturales en la playa sean un factor adicional que haya influido en la zona de distribución, donde se encuentran ubicados los nidos. En el transcurso de los monitoreos se registraron falsas anidaciones delante de las bermas, donde solo se observaba el arrastre sin evidencia de desove, patrón que sugiere efecto negativo de procesos de erosión sobre la actividad de anidación (Recaséns *et al.*, 2010).

CONCLUSIONES

Aunque es difícil señalar la causa definitiva de la disminución de la actividad de anidación a lo largo de los años, las tortugas verdes en Playa Lagarto presentaron una marcada estacionalidad en su actividad de anidación, con un pico significativo entre diciembre y abril, especialmente en febrero y marzo. Esta concentración de eventos coincidió con condiciones ambientales favorables y patrones lunares específicos, subrayando la importancia de estos meses para la conservación de la especie.

El estudio evidenció que las altas temperaturas están afectando negativamente la anidación. La resequead de la arena dificultó la excavación y formación de nidos, lo que ha resultó en un aumento de anidaciones fallidas. Además, las tortugas emplearon más tiempo y esfuerzo en encontrar sitios adecuados, lo que impacta su éxito reproductivo. Las tortugas más pequeñas tuvieron un mayor éxito de anidación, probablemente debido a que poseen menos huevos y requirieron menos tiempo para anidar. Sin embargo, las hembras más grandes aportan más crías por nidada. Este cambio en la estructura de tallas podría tener implicaciones negativas para la población a largo plazo.

La vegetación y la localización del nido son factores clave para el éxito reproductivo. Las zonas con vegetación y mayor elevación sobre la línea de marea alta fueron seleccionadas con mayor frecuencia, sugiriendo que ofrecen mejores condiciones para el desarrollo embrionario y la supervivencia de las crías. En Playa Lagarto, la mayor frecuencia de nidos en el segmento P5 indicó que solo una porción de la playa posee condiciones óptimas para la anidación. Dado que la tortuga verde se encuentra en peligro de extinción, según la lista roja de la UICN, es crucial implementar medidas de conservación urgentes para proteger hábitats críticos como Playa Lagarto.

AGRADECIMIENTOS

Se les agradece a los directores de Tortugas Pedasí, Robert e Isabelle Shahverdians por facilitar los datos para realizar este artículo y a los revisores anónimos su colaboración en las correcciones del manuscrito. También a Géminis Vargas por las observaciones al manuscrito.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alvarado, J. & Figueroa, A. (1986). *The ecological recovery of sea turtles of Michoacan, Mexico: special attention, the black turtle (Chelonia mydas agassizi)*. World Wildlife Fund (US); US Fish and Wildlife Service.
- Amoroch, D. F., Rodríguez-Zuluaga, J. A., Payán, L. F., Zapata, L. A. & Rojas, P. A. (2015). Plan de manejo de las tortugas marinas del Parque Nacional Natural Gorgona. *Parques Nacionales Naturales, Cali, Colombia*.
- Azanza, J., Ibarra, M. E., Espinosa, G., Díaz, R. & González-Sansón, G. (2003). Conducta de anidación de la tortuga verde (*Chelonia mydas*) en las playas Antonio y Caleta de los Piojos de la Península de Guanahacabibes, Pinar del Río, Cuba. *Revista de Investigaciones Marinas*, 24(3), 231-240.
- Bennett, L. (2018). Sea Turtles, Cheloniidae and Dermatochelyidae. Ocean, find your blue. Smithsonian Ocean. <https://ocean.si.edu/ocean-life/reptiles/sea-turtles>
- Bjorndal, K. A. (1980). Nutrition and grazing behavior of the green turtle *Chelonia mydas*. *Marine Biology*, 56, 147-154.
- Bjorndal, K. A. (1985). Nutritional ecology of sea turtles. *Copeia*, 736-751.
- Bjorndal, K. A. & Bolten, A. B. (1988). Growth rates of immature green turtles, *Chelonia mydas*, on feeding grounds in the southern Bahamas. *Copeia*, 555-564.
- Bocourt, M. (1868). Description de *quelques cheloniens* nouveaux appartenant a la Faune Mexicaine. *Ann. Sci. Nat. Zool.*, 10, 121-122.
- Bolten, A. B. (2000). Técnicas para la medición de tortugas marinas. *Técnicas de Investigación y Manejo para la Conservación de las Tortugas Marinas*, 4, 126-31.
- Bolten, A. B., Lutz, P. L., Musick, J. A. & Wyneken, J. (2003). Variation in sea turtle life history patterns: neritic vs. oceanic developmental stages. *The biology of sea turtles*, 2, 243-257.

- Bowen, B. W., Meylan, A. B., Ross, J. P., Limpus, C. J., Balazs, G. H. & Avise, J. C. (1992). Global population structure and natural history of the green turtle (*Chelonia mydas*) in terms of matriarchal phylogeny. *Evolution*, 46(4), 865-881.
- Brand-Gardner, S. J., Limpus, C. J. & Lanyon, J. M. (1999). Diet selection by immature green turtles, *Chelonia mydas*, in subtropical Moreton Bay, south-east Queensland. *Australian Journal of Zoology*, 47(2), 181-191.
- Brenes Arias, O., Bonilla L., Bonilla, A. & Vega, A. (2015). Características de la anidación de *Lepidochelys olivacea* (Testudinata: Cheloniidae) entre el 2010 y 2012 en Playa Tortuga Ojochal de Osa, Puntarenas, Costa Rica. *Revista de Biología Tropical*, 63, 339-349.
- Bruno, R., Restrepo, J. & Valverde, R. (2020). Effects of El Niño Southern Oscillation and local ocean temperature on the reproductive output of green turtles (*Chelonia mydas*) nesting at Tortuguero, Costa Rica. *Marine Biology*, 167. <https://doi.org/10.1007/s00227-020-03749-z>
- Carr, A. (1975). The Ascension Island green turtle colony. *Copeia*, 547-555.
- Carr, A. & Ogren, L. (1960). The ecology and migrations of sea turtles, 4. *Bull. Am. Mus. Nat. Hist.*, 121(1), 1-48.
- Castillero, R. G., López-Lozano, L. F. & Jiménez-Arias, S. (2024). Caracterización de la actividad de anidación de tortugas marinas en Playa Morrillo, Veraguas, Panamá. *Tecnociencia*, 26(1), 39–59. <https://doi.org/10.48204/j.tecno.v26n1.a4649>
- Chacón, D., Dick, B., Harrison, E., Sarti, L. & Solano, M. (2008). Manual sobre técnicas de manejo y conservación de las tortugas marinas en playas de anidación de Centroamérica. *Secretaría Pro Tempore de la Convención Interamericana para la Protección y Conservación de las Tortugas Marinas (CIT)*, San José, Costa Rica.
- Chaloupka, M., Bjorndal, K. A., Balazs, G. H., Bolten, A. B., Ehrhart, L. M., Limpus, C. J. ... & Yamaguchi, M. (2008). Encouraging outlook for recovery of a once severely exploited marine megaherbivore. *Global Ecology and Biogeography*, 17(2), 297-304. <https://doi.org/10.1111/j.1466-8238.2007.00367.x>
- Chávez, A. (1994). Efecto de la Luna en la actividad de los animales. *Lunario 2002*.

- Chen, H. C., Cheng, I. J. & Hong, E. (2007). The influence of the beach environment on the digging success and nest site distribution of the green turtle, *Chelonia mydas*, on Wan-an Island, Penghu Archipelago, Taiwan. *Journal of Coastal Research*, 23(5), 1277-1286. <https://doi:10.2112/05-0455.1>
- Cheng, I., Huang, C., Hung, P., Ke, B., Kuo, C. & Fong, C. (2009). Ten years of monitoring the nesting ecology of the Green Turtle, *Chelonia mydas*, on Lanyu (Orchid Island), Taiwan. *Zoological Studies*, 48, 83-94.
- D'Croz, L., & O'Dea, A. (2007). Variability in upwelling along the Pacific shelf of Panama and implications for the distribution of nutrients and chlorophyll. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 73(1-2), 325-340. <https://doi.org/10.1016/J.ECSS.2007.01.013>
- Eckert, K. L., Bjorndal, K. A., Abreu-Grobois, F. A. & Donnelly, M. (2000). Técnicas de Investigación y Manejo para la Conservación de las Tortugas Marinas. *Grupo especialista en tortugas marinas UICN/CSE Publicación*, 4.
- Ferrerira, B., Garcia, M., Jupp, B.P. & Al-Kiyumi, A. (2006). Diet of the green turtle (*Chelonia mydas*) at Ra's Al Hadd, Sultanate of Oman. *Chelonian Conserv. Biol.* 5, 141-146.
- Flores, E., De La Cruz, J., Seminoff, J. & Urena, L. (2021). Local ecological knowledge supports identification of sea turtle nesting beaches in Panama.
- Forbes, G. A. (1994). The diet of the green turtle in an algal-based coral reef Community-Heron Island, Australia. In *Proc 13th Annu Symp Sea Turtle Biol Conserv. NOAA Tech Memo NMFSSEFSC-341* (pp. 57-59).
- Garcés, H., Batista, A. & Sánchez, N. (2020). Caracterización de sitios de anidación de tortugas marinas en Playa Lagarto, Pedasí, Provincia de Los Santos, Panamá. *Tecnociencia*, 22(2), 259-277.
- Godley, B., Broderick, A. & Hays, G. (2001). Nesting of green turtles (*Chelonia mydas*) at Ascension Island, South Atlantic. *Biological Conservation*, 97, 151-158. [https://doi.org/10.1016/S0006-3207\(00\)00107-5](https://doi.org/10.1016/S0006-3207(00)00107-5)
- Green, D. & Ortiz-Crespo, F. (1982). Status of sea turtle populations in the central eastern Pacific. *Biology and conservation of sea turtles. Smithsonian Institution Press, Washington, DC*, 221-233.
- Gremone, C. & Gómez, J. L. (1983). Isla de Aves como área de desove de la tortuga verde *Chelonia mydas*. *Fudena, Caracas, Venezuela*.

- Guerra, C., Ricardo, J., Ávila, R., Bretos, F. & Álvarez, P. (2021). Influence of Sandy Coast Vegetation on the Reproductive Success of Green Turtles at Cuban Nesting Beaches. *Chelonian Conservation and Biology: Celebrating 25 Years as the World's Turtle and Tortoise Journal*, 20, 254 - 264. <https://doi.org/10.2744/CCB-1460.1>
- Hendrickson, J. R. (1958). The green sea turtle, *Chelonia mydas* (Linn.) in Malaya and Sarawak. *Proceedings of the Zoological Society of London*, 130(4), 455-535.
- Hilton-Taylor C (2000) IUCN Red List of threatened species. IUCN, Gland
- Houtan, K. & Bass, O. (2007). Stormy oceans are associated with declines in sea turtle hatching. *Current Biology*, 17, R590-R591. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2007.06.021>
- Instituto de Meteorología e Hidrología de Panamá. (2024). Instituto de Meteorología e Hidrología de Panamá. Recuperado 25 de julio de 2024, de <https://www.imhpa.gob.pa/es/>
- Jensen, M. P., FitzSimmons, N. N., Bourjea, J., Hamabata, T., Reece, J. & Dutton, P. H. (2019). *The evolutionary history and global phylogeography of the green turtle (Chelonia mydas)*. *Journal of Biogeography*. <https://doi:10.1111/jbi.13483>
- Johnson, S. A. & Ehrhart, L. M. (1996). *Reproductive Ecology of the Florida Green Turtle: Clutch Frequency*. *Journal of Herpetology*, 30(3), 407. doi:10.2307/1565180
- Kamezaki, N. & Matsui, M. (1995). *Geographic Variation in Skull Morphology of the Green Turtle, Chelonia mydas, with a Taxonomic Discussion*. *Journal of Herpetology*, 29(1), 51. <https://doi:10.2307/1565085>
- Kim, I. H., Park, I. K., Park, D., Kim, M. S., Cho, I. Y., Yang, D. ... & An, Y. R. (2024). Habitat use of loggerhead (*Caretta caretta*) and green (*Chelonia mydas*) turtles at the northern limit of their distribution range of the Northwest Pacific Ocean. *Plos one*, 19(4), e0290202. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0290202>
- Koch, V., Brooks, L. B. & Nichols, W. J. (2007). Population ecology of the green/black turtle (*Chelonia mydas*) in Bahía Magdalena, Mexico. *Marine Biology*, 153, 35-46. <https://doi:10.1670/08-115.1>
- Kubis, S., Chaloupka, M., Ehrhart, L. & Brette, M. (2009). Growth rates of juvenile green turtles *Chelonia mydas* from three ecologically distinct foraging habitats along the

- east central coast of Florida, USA. *Marine Ecology Progress Series*, 389, 257-269. <https://doi:10.3354/meps08206>
- Le Gouvello, D. Z. M., Nel, R. & Cloete, A. E. (2020). *The influence of individual size on clutch size and hatchling fitness traits in sea turtles. Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 527, 151372. <https://doi:10.1016/j.jembe.2020.151372>
- Limpus, C. J. & Limpus, D. J. (2000). Mangroves in the diet of *Chelonia mydas* in Queensland, Australia. *Marine Turtle Newsletter*, 89, 13-15.
- Limpus, C. J., Miller, J. D. & Pfaller, J. B. (2020). Flooding-induced mortality of loggerhead sea turtle eggs. *Wildlife Research*, 48(2), 142-151. <https://doi.org/10.1071/WR20080>
- Limpus, C. & Chaloupka, M. (1997). Nonparametric regression modelling of green sea turtle growth rates (southern Great Barrier Reef). *Marine Ecology Progress Series*, 149, 23-34. <https://doi:10.3354/meps149023>
- Lindborg, R., Neidhardt, E., Smith, J. R., Schwartz, B., Hernandez, V., Savage, A. & Witherington, B. (2019). *An Ethogram Describing the Nesting Behavior of Green Sea Turtles (Chelonia mydas). Herpetologica*, 75(2), 114-122. <https://doi:10.1655/d-18-00015>
- Lombardo, R. C. & Saavedra, D. Y. (2023). Características de la anidación de tortugas marinas: *Lepidochelys olivacea* y *Chelonia mydas*, en playa lagarto, Los Santos, Panamá. *Tecnociencia*, 25(1), 63-88.
- López, L. F. L. & Arias, S. J. (2024). Primer reporte de la temporada de anidación de la tortuga verde *Chelonia mydas* (Testudinata: Cheloniidae) en playa Lagarto, península de Azuero, Panamá. *Revista Ciencias Marinas y Costeras*, 16(2), 99-113.
- Márquez, M. R. (1990). FAO species catalogue. Vol. 11. Sea turtles of the world. An annotated and illustrated catalogue of sea turtle species known to date.
- Márquez, R. & Farías, M. (2000). *Las tortugas marinas y nuestro tiempo* (pp. 197-197). México DF: Fondo de cultura económica.
- Miller, J. D. (2017). Reproduction in sea turtles. *The Biology of Sea Turtles, Volume I*, 51-81.
- Mortimer, J. A. (1982). Feeding ecology of sea turtles. *Biology and conservation of sea turtles. Smithsonian Institution Press, Washington, DC*, 103.

- Mortimer, J. A. (1990). The influence of beach sand characteristics on the nesting behavior and clutch survival of green turtles (*Chelonia mydas*). *Copeia*, 802-817. <https://doi:10.2307/1446446>
- NMFS. (1998) Recovery plan for East Pacific green turtle (*Chelonia mydas*). National Marine Fisheries Service, Silver Spring, MD
- Patricio, A., Varela, M., Barbosa, C., Broderick, A., Airaud, M., Godley, B. ... & Catry, P. (2018). Nest site selection repeatability of green turtles, *Chelonia mydas*, and consequences for offspring. *Animal Behaviour*, 139, 91-102. <https://doi.org/10.1016/j.anbehav.2018.03.006>
- Payo, A., Kobayashi, N., Muñoz-Pérez, J. & Yamada, F. 2008. Predictibilidad de la formación de escarpe en playas de arena en un tanque multidireccional de oleaje. *Ciencias Mar.* 34(1): pp. 45–54. <https://doi:10.7773/cm.v34i1.1265>
- Peel, M. C., Finlayson, B. L. & McMahon, T. A. (2007). *Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. Hydrology and Earth System Sciences*, 11(5), 1633–1644. <https://doi:10.5194/hess-11-1633-2007>
- Peñalba Laguna, M. D. L. Á. & Rios Rivera, R. M. (2013). Estudio reproductivo de *Chelonia mydas*, en la playa de anidación Brasilón en el pacífico sur de Nicaragua (Doctoral dissertation).
- Pertiwi, M. P. & Lathifah, S. S. (2019). Conditions of hilling habitat of *Chelonia Mydas* (Green Turtle) in Pangumbahan Beach Ujung Genteng, Sukabumi Selatan. *Journal of Science Innovare*, 1(2), 64-67. <https://doi.org/10.33751/JSI.V1I02.1003>
- Pinto, I. & Yee, J. (2011). Diagnóstico de las áreas marinas protegidas y de las áreas marinas para la pesca responsable en el Pacífico panameño. *Fundación Marviva, Panama*.
- Poti, M., Long, S., Rusli, M., Jani, J., Hugé, J. & Dahdouh-Guebas, F. (2021). Changing trends and perceptions of sea turtle egg consumption in Redang Island, Malaysia. *Ecology and Society*. <https://doi.org/10.5751/es-12717-260414>
- Read, M. A. (1991). *Observations on the feeding ecology of immature green turtles, Chelonia mydas, in the Moreton Banks region of Moreton Bay, South East Queensland* (Doctoral dissertation, University of Queensland).

- Recaséns, A. B. C., García, A. M., Rodríguez, V. T. & Vicario, A. G. (2010). Vulnerabilidad de sitios de anidación de tortugas marinas por efectos de erosión costera en el estado de Campeche. *En memoria*, 73.
- Restrepo, J., Webster, E. G., Ramos, I. & Valverde, R. A. (2023). Recent decline of green turtle *Chelonia mydas* nesting trend at Tortuguero, Costa Rica. *Endangered Species Research*, 51, 59-72. <https://doi.org/10.3354/esr01237>
- Rivera-Solís, J. A. (2021). Depósitos eólicos del trópico húmedo: caso de la franja marino-costera del este de la Península de Azuero, Panamá. *Revista Geográfica de América Central*, (66), 79-105.
- Rubiano Ciodaro, D. (2011). Caracterización de playas de anidación de tortugas marinas en Isla Fuerte, Bolívar, Caribe Colombiano.
- Rueda-Almonacid, J. V., Mittermeier, C. G., Carr, J. L., Mittermeier, R. A., Rodríguez-Mahecha, J. V., ... & Mittermeier, C. G. (2007). *Las tortugas y los cocodrilianos de los países andinos del trópico* (Serie Guías Tropicales de Campo No. 6). Conservación Internacional.
- Salleh, S., Nishizawa, H., Sah, S. & Chowdhury, A. (2020). Reproductive seasonality and environmental effects in green turtle (*Chelonia mydas*) nesting at Penang Island, Malaysia. *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom*, 100, 645 - 650. <https://doi.org/10.1017/S0025315420000399>
- Schulz, J. P. (1975). Sea turtles nesting in Surinam. *Zoologische Verhandelingen*, 143(1), 1-141.
- Seminoff J. A., Resendiz A. & Nichols W. J. (2002) Diet of the east Pacific green turtle, *Chelonia mydas*, in the central Gulf of California, Mexico. *Journal Herpetology* 36:447–453
- Seminoff, J. A. (2004). *Chelonia mydas*. The IUCN Red List of Threatened Species 2004: Supplementary material.
- Seminoff, J. A., Jones, T. T. & Marshall, G. J. (2006). Underwater behaviour of green turtles monitored with video-time-depth recorders: what's missing from dive profiles? *Marine Ecology Progress Series*, 322, 269-280.

- Sole, G. & Medina, G. (1989). The green turtles of Aves Island. In *Eckert SA, Eckert KA, Richardson TH (Compilers) Proc 9th Annu Workshop Sea Turtle Conservation Biology. NOAA Tech Memo NMFS-SEFC-232, US Dept Commerce, Miami, FL* (pp. 171-173).
- Sunamura, T. (1989). Sandy beach geomorphology elucidated by laboratory modeling. In *Elsevier Oceanography Series* (Vol. 49, pp. 159-213). Elsevier. [https://doi:10.1016/S0422-9894\(08\)70126-0](https://doi:10.1016/S0422-9894(08)70126-0)
- Torres, D. A. P., Rangel, J. L. H., Henrique, A. R. B., Ojeda, M. J. D. & Sánchez, N. R. Q. (2012). De tortuga verde (*Chelonia mydas*) en el refugio de fauna silvestre Isla de Aves, Venezuela. *Revista Científica*, 22(3).
- Valverde-Cantillo, V., Robinson, N. J. & Santidrián Tomillo, P. (2019). Influence of oceanographic conditions on nesting abundance, phenology and interesting periods of east Pacific green turtles. *Marine Biology*, 166(7), 93. <https://doi.org/10.1007/s00227-019-3541-1>
- Veelenturf, C., Sinclair, E., Leopold, P., Paladino, F. & Honarvar, S. (2021). The effects of nest location and beach environment on hatching success for leatherback (*Dermochelys coriacea*) and green (*Chelonia mydas*) sea turtles on Bioko Island, Equatorial Guinea. *Marine Biology*, 169. <https://doi.org/10.1007/s00227-022-04049-4>
- Vera, V. & Buitrago, J. (2012). Actividad reproductiva de *Chelonia mydas* (Testudines: Cheloniidae) en Isla de Aves, Venezuela (2001-2008). *Revista de Biología Tropical*, 60(2), 745-758.
- Whiting, A. U., Chaloupka, M. & Limpus, C. J. (2020). Sampling nesting sea turtles: impact of survey error on trend detection. *Marine Ecology Progress Series*, 634, 213-223. <https://doi.org/10.3354/meps13202>
- Witherington, B. E. (1992). Behavioral responses of nesting sea turtles to artificial lighting. *Herpetologica*, 31-39.



Caracterización de periodos de suelos y estimación del efecto de sito en el distrito de Arraiján, Provincia de Panamá Oeste, Panamá

Characterization of Soil Periods and Estimation of Site Effects in the District of Arraiján, Panama Oeste Province, Panama

Katherine M. Flores,

Universidad de Panamá, Instituto de Geociencias, Panamá.

katherine-m.flores@up.ac.pa

<https://orcid.org/0009-0002-1999-6429>

Néstor Luque

Universidad de Panamá, Instituto de Geociencias, Panamá.

nestor.luque@up.ac.pa

<https://orcid.org/0000-0003-4564-1947>

Javier Lermo,

Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Ingeniería, México.

jlermoS@iingen.unam.mx

<https://orcid.org/0000-0002-5336-5332>

Héctor Pineda

Universidad de Panamá, Instituto de Geociencias, Panamá.

hector.pineda-s@up.ac.pa

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

Patricia Camarena

Universidad de Panamá, Instituto de Geociencias, Panamá.

patricia.camarena@up.ac.pa

<https://orcid.org/0009-0009-6758-0322>

Ariadna Flores

Universidad de Panamá, Facultad de Ingeniería, Panamá.

ariadna.flores@up.ac.pa

<https://orcid.org/0009-0002-4724-542X>

Fecha de recepción: 4 de abril de 2025

Fecha de aceptación: 25 de abril 2025

DOI: <https://doi.org/10.48204/j.tecno.v27n2.a7660>

RESUMEN

Los sismos constituyen una de las amenazas geológicas más sensitivas ya que, a nivel mundial tiene un mayor potencial destructor (Benito Oterino, 2013). El rápido crecimiento urbano, impulsado por la creciente demanda

habitacional, ha favorecido la expansión de asentamientos hacia zonas que carecen de un plan de ordenamiento territorial (INEC, 2023), y pueden estar expuestas a una amenaza geológica, esta ausencia de planificación ha generado el interés de realizar investigaciones que permitan caracterizar las condiciones del terreno, para ello se planea un análisis de las vibraciones ambientales empleando la técnica de Nakamura H/V (Nakamura, 2019) utilizando sismómetros de banda ancha, identificando zonas con posible amplificación local de ondas, junto con la evaluación de las características geotécnicas de la zona, que abarca materiales desde el Oligoceno hasta el Cuaternario (Cowan et al., 1998; García, 2010; Rockwell et al., 2010). Se han identificado en las giras de campo diversos tipos de rocas, suelos residuales y coluviales, cada uno con características específicas de meteorización y composición.

El proyecto se centró en la recopilación de datos de 40 puntos de muestreo con sismómetro de banda ancha, recolección de suelos para identificar propiedades geotécnicas y geofísicas, análisis de perforaciones realizadas en construcciones dentro del área de estudio, con el objetivo de elaborar un modelo estratigráfico que será utilizado en DEGTRA (Lermo & Chávez-García, 1994). En consecuencia, para darle un valor de detalle se incorporó un histograma de sismicidad un total de 213 eventos sísmicos registrados por el Instituto de Geociencias de la Universidad de Panamá durante el periodo comprendido entre 2016 y 2023, con el fin de respaldar la evaluación de la actividad sísmica.

PALABRAS CLAVE

Ondas sísmicas, dinámica de suelos, Geotecnia, Panamá

ABSTRACT

Earthquakes represent one of the most significant geological hazards, as they possess the highest destructive potential worldwide (Benito Oterino, 2013). Rapid urban growth, driven by increasing housing demand, has led to the expansion of settlements into areas lacking territorial planning (INEC, 2023), which may be exposed to geological hazards. This absence of planning has sparked interest in conducting investigations aimed at characterizing ground conditions. To this end, an analysis of ambient vibrations is proposed using the Nakamura H/V technique (Nakamura, 2019) with broadband seismometers, to identify areas with

potential local wave amplification, along with the assessment of the geotechnical characteristics of the zone, which includes materials ranging from the Oligocene to the Quaternary (Cowan et al., 1998; García, 2010; Rockwell et al., 2010). Field campaigns have identified various types of rocks, residual soils, and colluvial deposits, each exhibiting specific weathering and compositional characteristics.

The project focused on the collection of data from 40 sampling points using broadband seismometers, soil sampling to identify geotechnical and geophysical properties, and the analysis of borehole data from constructions within the study area, with the objective of developing a stratigraphic model to be implemented in DEGTRA (Lermo & Chávez-García, 1994). Consequently, to enhance the level of detail, a seismicity histogram was incorporated, comprising a total of 213 seismic events recorded by the Institute of Geosciences of the University of Panama during the period between 2016 and 2023, in order to support the assessment of seismic activity.

KEYWORDS

Seismic waves, soil dynamics, Geotechnics, Panama

INTRODUCCIÓN

A partir del terremoto de Michoacán, México de 1985 se reconoció el factor fundamental que juegan las condiciones locales del terreno en la severidad de los daños (Campillo et al., 1985) Los estudios de amplificación sísmica se realizan como un insumo para una mejor planificación urbana eficiente y segura (Tallini et al., 2024). En nuestro país los planes de planificación territorial pueden ser escasos o inexistentes, lo que conlleva un surgimientos de asentamientos espontáneos (De León, 2023), algunos de los cuales se ubican en zonas sísmicamente activas. Por lo tanto, es crucial identificar los efectos del sitio en las comunidades analizando las características específicas del suelo. Esta información es vital para el desarrollo de modelos de construcción que ayuden a reducir las vulnerabilidades asociadas a este riesgo. Para dar con este análisis se aplicó la técnica H/V (Coban, 2024), sondeos MASW, así como también perforaciones mecánicas de recuperación continua. Estas técnicas fueron realizadas en la ampliación a 8 carriles de la vía Roberto Chiari, la línea 3 del metro de Panamá en los corregimientos de Arraiján Cabecera, Veracruz, Burunga, Cáceres, Provincia de Panamá Oeste, Panamá; Posteriormente se unificaron los criterios, para luego evaluar en conjunto los insumos (Pistillo et al., 2024); seguidamente identificar familias espectrales distintas, agrupadas por sus características de amplificación en diversos rangos de frecuencia (Toala et al., 2024). Se elaboraron mapas de periodos y amplitud relativa para identificar zonas de mayor amenaza, utilizando el programa ArcGIS (ESRI, 2021) basándose en familia espectral, variabilidad espacial (Rivas Orellana, 2024).

Para la recopilación de datos, se desplegaron sismómetros Trillium Compact de 120s, orientados al norte y colocados en condiciones controladas para evitar interferencias. Estos dispositivos se utilizaron en un área de 7.39 km², con una distribución precisa de puntos de medición a menos de 1 km de distancia entre sí. Se prestó especial atención en evitar sitios con vegetación densa, suelos saturados o estructuras cercanas que pudieran afectar las mediciones siguiendo la guía sugerida por el proyecto SESAME (2004), El equipo fue protegido contra condiciones meteorológicas adversas mediante un empaquetado especializado.

ANTECEDENTES

Técnica de Nakamura

El método de Nakamura (1989), para estimar el efecto de sitio en estudios sísmicos, propuso que el cociente entre las componentes horizontal y vertical de la respuesta sísmica en el

dominio frecuencial puede ser un buen indicador del efecto de sitio (Nakamura, 2019). Este método, aplicado inicialmente a micro temblores en áreas urbanas de Japón, se ha popularizado debido a su fiabilidad, rapidez al realizar las mediciones su tiempo es corto y economía por tener costos bajos en equipos.

La primera definición de la relación H/V es una amplificación obtenida usando la razón espectral de la componente horizontal respecto a la vertical (Schmidt, 2016). La técnica de Nakamura consiste en la determinación de los espectros de Fourier de las componentes horizontales y de la vertical de registros de vibraciones ambientales, obtenidos con un velocímetro o un acelerógrafo triaxial (Nakamura, 2000).

El efecto de las ondas Rayleigh es visible principalmente en el movimiento vertical, y por tanto se puede definir la siguiente ecuación:

$$E_s = \frac{S_{VS}}{S_{VB}} \quad (1)$$

S_{VS} : Espectro vertical de amplitudes de Fourier medido en la superficie del suelo (denotada como S).

S_{VB} : Espectro vertical de amplitudes de Fourier medido en la base del nivel de suelo (denotada como B).

Si el valor es de uno indica que no hay presencia significativa de ondas Rayleigh, sugiriendo que las componentes verticales y horizontales de las ondas sísmicas se comportan de manera similar, pero si el valor es menor a uno indica una mayor presencia de ondas Rayleigh. En este caso, la componente vertical del espectro es relativamente baja en comparación con la componente horizontal, reflejando el impacto de las ondas superficiales en el suelo (Sandoval & Vera, 2013).

Nakamura propone que el efecto de las ondas Rayleigh se manifiesta principalmente en el movimiento vertical. Para corregir este efecto, se utilizan dos razones espectrales: la razón de la componente vertical y la función de transferencia modificada para las ondas Rayleigh. La razón vertical se define como la relación entre el espectro vertical en la superficie y en la base del nivel de suelo. Esta razón ayuda a identificar la presencia de ondas Rayleigh, mientras que la función de transferencia modificada considera el efecto de estas ondas para proporcionar una estimación más precisa del efecto de sitio (Sandoval & Vera, 2013).

La ecuación de función de transferencia se muestra de la siguiente manera:

$$S_T = \frac{S_{HS}}{S_{HB}} \quad (2)$$

Nakamura propuso la siguiente ecuación:

$$S_M = \frac{S_T}{E_s} = \frac{S_{HS} * S_{VB}}{S_{HB} * S_{VS}} \quad (3)$$

Espectro Vertical en la Superficie (S_{VS}): Representa la amplitud de las ondas verticales en la superficie del suelo. Las ondas Rayleigh, al ser ondas superficiales, tienen una mayor influencia en el movimiento vertical cerca de la superficie. Por lo tanto, captura el efecto de estas ondas en la capa superior del suelo (Johnson & DeGraff, 1988).

Espectro Vertical en la Base (S_{VB}): Representa la amplitud de las ondas verticales en la base del nivel de suelo, justo sobre el sustrato rocoso. En la base, el efecto de las ondas Rayleigh es menos prominente, y proporciona una medida de cómo las ondas verticales se comportan en el sustrato o en la parte inferior del perfil del suelo (Johnson & DeGraff, 1988).

Hay desafíos en la estimación de la frecuencia natural del suelo utilizando registros de ruido ambiental. Destacan algunas investigaciones que el proceso de estimación es complejo debido a la presencia de ruidos impulsionales, que son cortos pero intensos, y que la técnica actual requiere una eliminación manual de estos ruidos para obtener una señal más clara. Esto ralentiza el proceso y carece de un criterio estandarizado (Sandoval & Vera, 2013). Los métodos existentes para automatizar la eliminación de ruidos, como los algoritmos *anti-trigger*, tienen limitaciones, ya que se basan en umbrales definidos arbitrariamente. Además, hay una falta de estudios sobre el impacto de estos ruidos en la precisión de la estimación espectral.

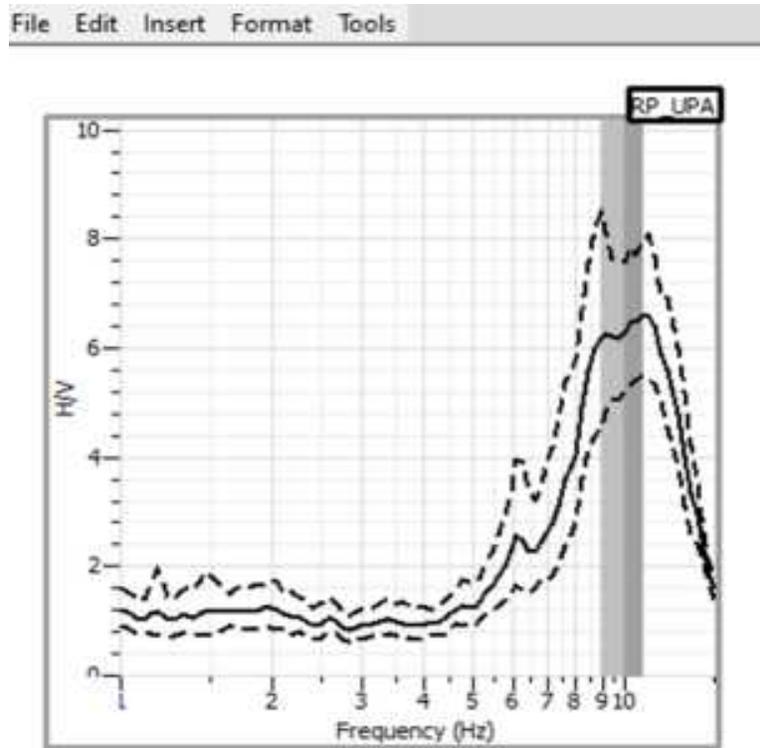
Efecto de sitio

Los suelos blandos, debido a su baja rigidez, tienen la capacidad de amplificar las ondas sísmicas, lo que incrementa el riesgo de daños en las estructuras. Los estudios de riesgo sísmico se enfocan en evaluar y caracterizar estos suelos para predecir cómo se comportarán durante un sismo. De acuerdo con la teoría, la transformada de Fourier juega un papel fundamental en este análisis. Si el cálculo de la frecuencia supera 3 en amplitud, se observa una amplificación relativa en un periodo específico, indicando una mayor vulnerabilidad. Por el contrario, si la frecuencia es inferior a 3 H/V, la energía se disipa, reduciendo el riesgo de amplificación.

Esto queda evidenciado en la *Figura 1*, que muestra una amplificación relativa para una frecuencia de 10 Hz, en campo se puede apreciar que es una zona de deposición de material coluvial, para disminuir la contaminación industrial se toman más de 10 ciclos significativos tener una disminuir la incertidumbre.

Figura 1.

Amplitud vs Frecuencia resultante en el punto PP-6



Dinámica de suelos

Las señales procesadas en H/V permiten visualizar y comparar las características del terreno en diferentes zonas. facilitando la identificación de zonas con características geotécnicas-geológicas equivalentes, la dinámica de suelos considera los efectos locales que pueden amplificar o modificar la respuesta sísmica en función de la estructura del subsuelo y las condiciones topográficas.

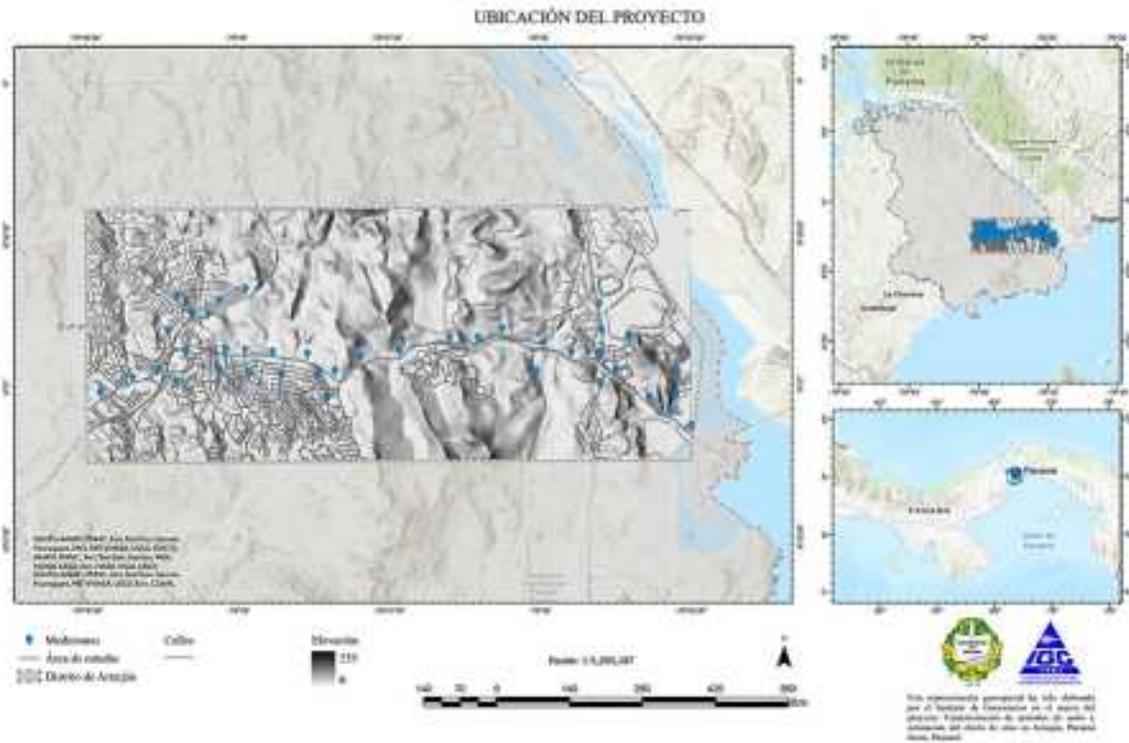
ZONA OBJETO DE ESTUDIO

El objetivo general de este trabajo es determinar el periodo y amplificación de ondas sísmicas

en áreas de Burunga, Arraiján, y en la carretera Interamericana tramo Arraiján – Puente de las Américas, mediante el método de Nakamura H/V. Finalmente cartografiar zonas por isoperiodos y amplificaciones relativas.

Figura 2.

Localización del área de estudio.



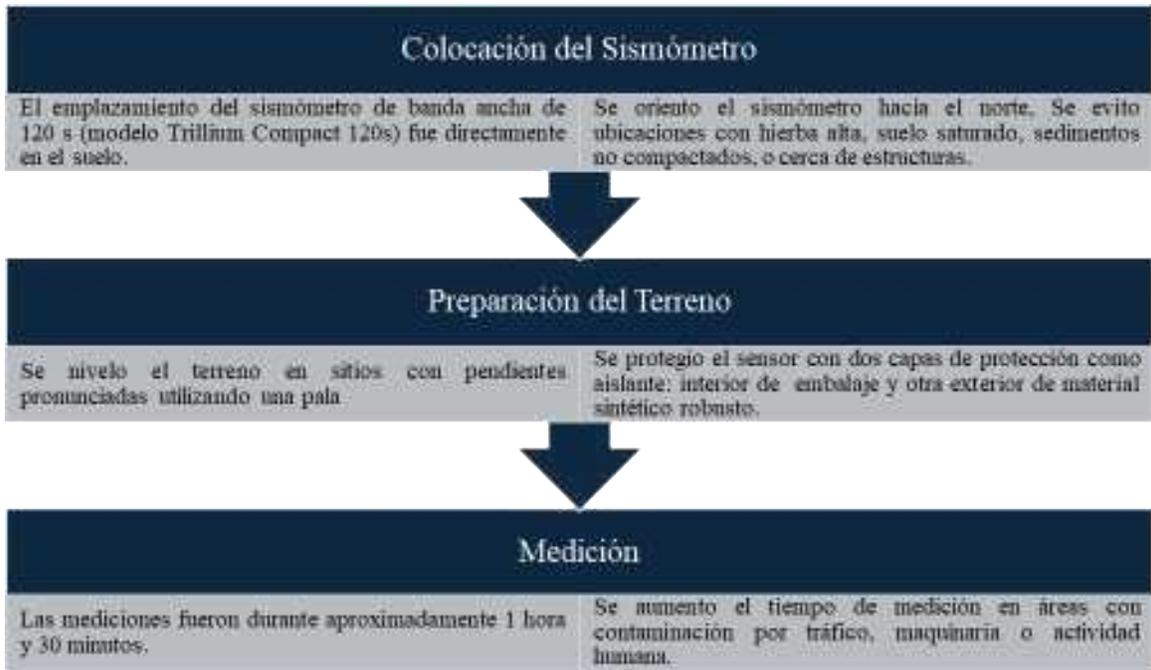
METODOLOGIA

Obtención de datos

Los datos fueron obtenidos mediante giras de campo realizadas en las que se midieron 40 puntos en diversas zonas del distrito de Arraiján, utilizando sismómetros de banda ancha Trillium compact de 120 s.

Figura 3.

Diagrama que indica el método de obtención de vibraciones ambientales



Procesamiento de señales para cálculo de H/V:

Para el procesamiento de los datos se utilizó el programa Geopsy versión 2.9.0

Con el propósito de obtener al menos 10 ciclos significativos en cada ventana se debe cumplir la siguiente condición: $F_0 > 10 / L_w$.

Donde F_0 corresponde a la frecuencia fundamental del lugar donde se toman los datos, medida en Hz y L_w al ancho de la ventana, en segundos (Ulloa, 2018).

Figura 4.

Cuadros de diálogos de la medición PP-17 con las ventanas estacionarias para el cálculo de las transformadas de Fourier en GEOPSY.

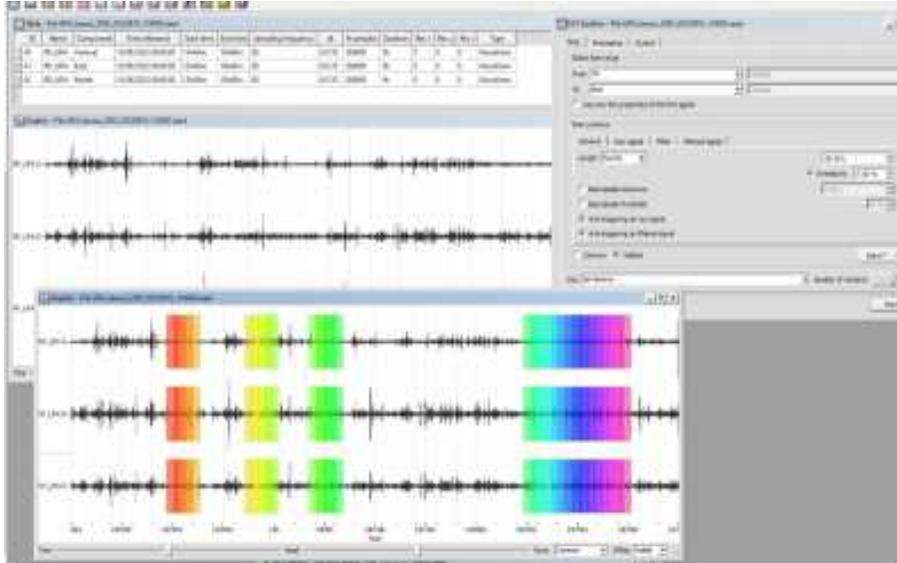
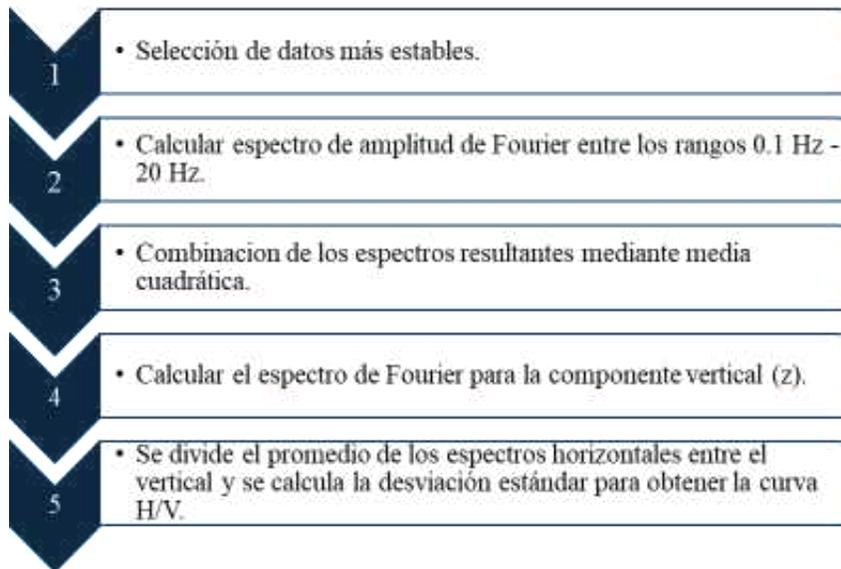


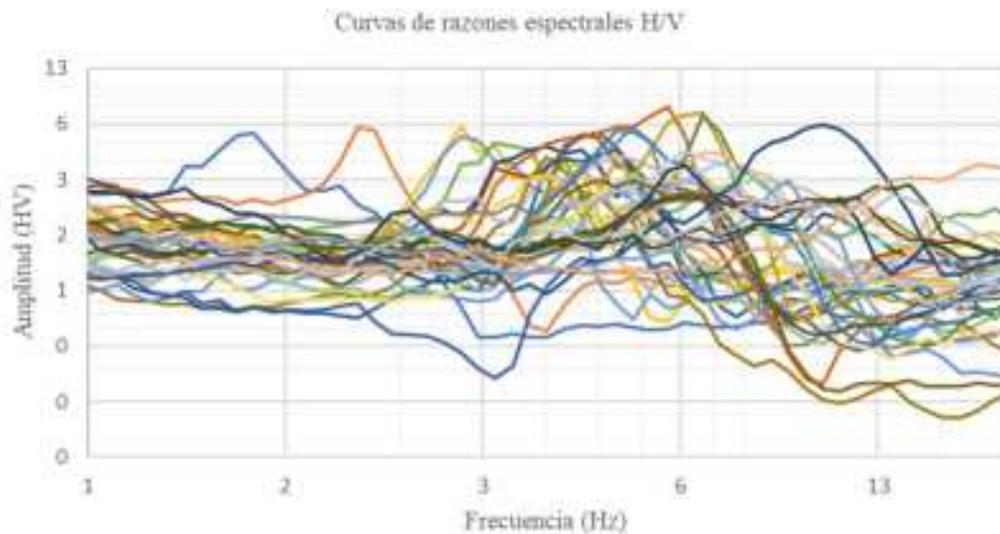
Figura 5.

Diagrama del procesamiento de los datos



Una vez calculadas todas las curvas H/V de los 40 puntos medidos en campo, los datos se grafican en Excel, donde se comparan las relaciones de amplitud vs frecuencia.

Figura 6.
Curvas resultantes de 40 puntos de medición.



Se utilizó el software GEOPSY que fue creado durante el proyecto europeo SESAME, ha proporcionado las herramientas para el procesamiento de vibraciones ambientales con caracterización de sitio (Sandoval & Vera, 2013).

La separación de las curvas espectrales permite identificar aquellas curvas con amplitudes similares en un rango específico de frecuencias, lo que facilita la clasificación de suelos con características mecánicas similares por este tipo de agrupación de curvas ya identificadas en un área cercana, dado que la amplificación de las ondas sísmicas depende de la frecuencia fundamental del suelo, esta separación ayuda a distinguir zonas con mayor o menor vulnerabilidad a la amplificación. Al agrupar las curvas en función de su amplitud, se logra una modelación geotécnica más precisa, adaptada a los diferentes comportamientos del terreno.

RESULTADOS

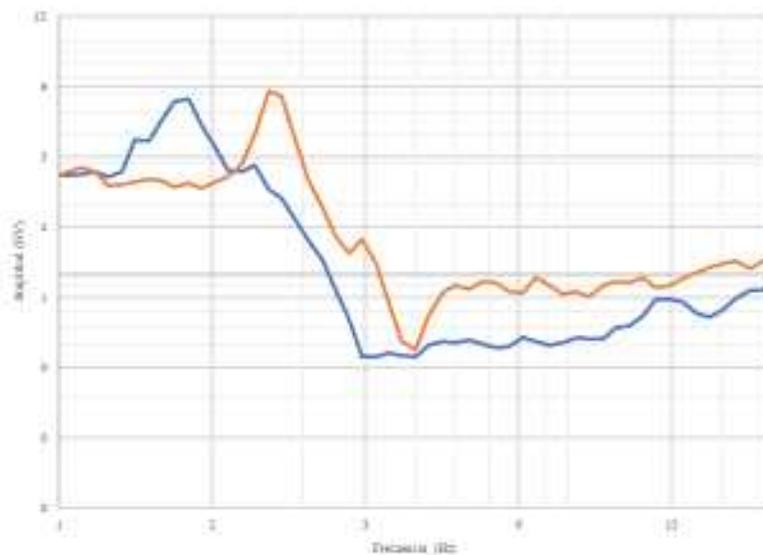
Luego de realizar el procesamiento de los 40 puntos, se procedió a analizar las curvas resultantes agrupándolas por rangos de frecuencia y amplificaciones relativas (denominadas familias espectrales).

- 1- Familia 1 (0.8 Hz - 2.50 Hz): Esta grafica del grupo 1 muestra picos de amplificación hasta 6 veces en frecuencias bajas entre los rangos de 0.8 Hz a 2.50 Hz (1.2 s a 0.4 s), puede estar relacionado a depósitos superficiales constituidos principalmente de

- 2- suelos que varían entre los limos plásticos a arcilla con espesores entre los rangos de 25 a 30 metros profundidad, adicional mediante el análisis de mecánica de suelo se determinó que los suelos presentes en esta medición tenían características LL 70 %, LP 39 %, IP 31 % y una densidad específica de 2.73 g/cm^3 lo que indica un comportamiento de suelo blando y altamente plástico definido en las muestras de laboratorio como un Limo plástico (MH) en los rangos de A-7-5. Estas condiciones favorecen a las amplificaciones sísmicas a baja frecuencia. Sin embargo, este grupo se mantiene con pocas curvas a interpolar, por tanto, se recomienda aumentar la densidad de puntos en las áreas cercanas para disminuir el margen de error; la función de transferencia se muestra en la figura 7.

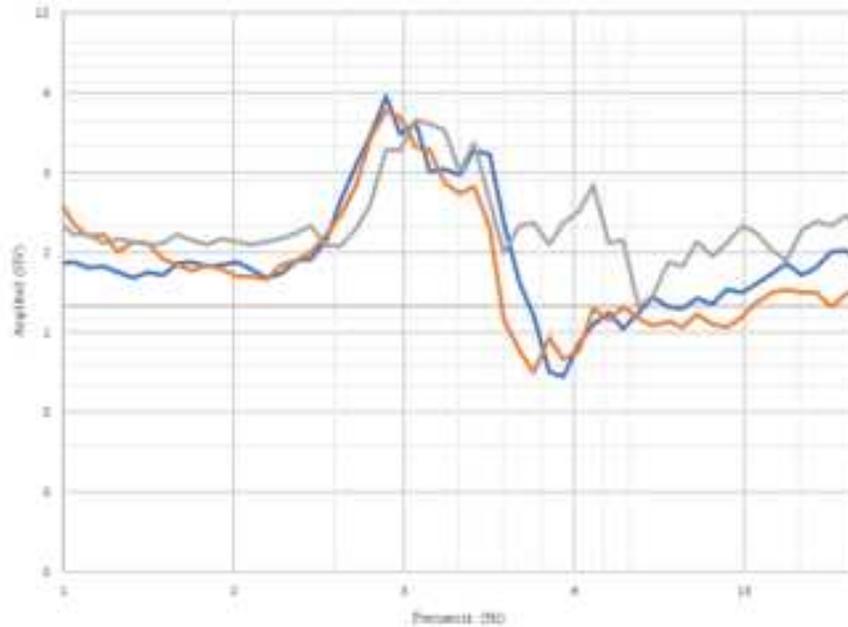
Figura 7.

Curva resultante de familia espectral 1.



- 3- Familia 2 (2.5 Hz – 3.5 Hz): En este grupo muestra picos de amplificación aproximadamente hasta 6 veces en frecuencias bajas entre los rangos de 2.5 Hz a 3.5 Hz (0.4 s a 0.29 s), principalmente estos suelos varían entre los limos a arcillas media a alta plasticidad con espesores entre los 5.0 a 10.0 metros profundidad, adicional mediante el análisis de laboratorio se determinó que los suelos presentes tenían características LL 69 %, LP 33%, IP 37% y una densidad específica de 2.72 g/cm^3 lo que indica un comportamiento de suelo blando y plástico definido en las muestras como una arcilla de alta plasticidad (CH) en los rangos de A-7-5. Estos espesores superficiales de poco espesor indican que este sitio parece ser susceptible a un efecto de amplificación; la función de transferencia se muestra en en la figura 8.

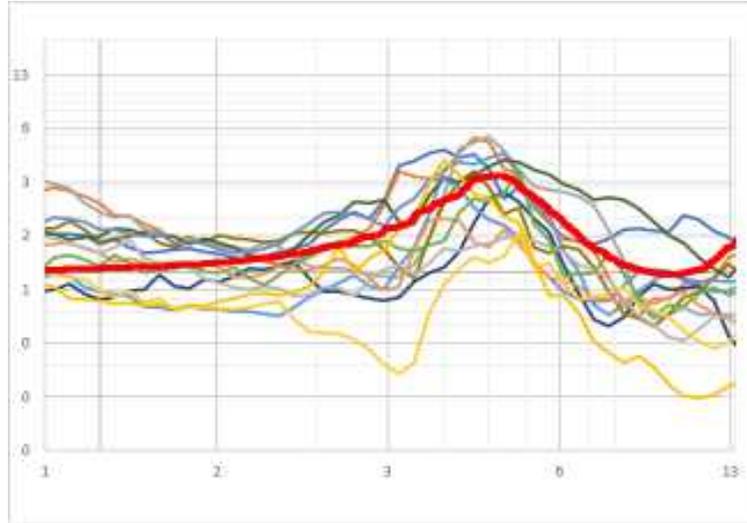
Figura 8.
Curva resultante de familia espectral 2.



- 4- Familia 3 (3.0 Hz - 6.0 Hz): Este pico se ubica en la banda de 4.0Hz a 6.0Hz y presenta amplificaciones mayores a 5, lo que indica una alta respuesta del suelo a las ondas en este rango de frecuencia. Además, esta familia cuenta con un gran número de mediciones como se muestra en la figura 9, lo que proporciona una mayor confiabilidad y precisión en la evaluación del comportamiento de este grupo (0.3 s a 0.16 s), mediante el análisis de laboratorio se determinó que los suelos presentes en este grupo tenían características min *LL* 33 %, max *LL* 67 % prom *LL* 50 %, min *LP* 24 %, max *LP* 43 % prom *LP* 32 %, *IP* 17% y una densidad específica de 2.66 g/cm³ lo que indica un comportamiento de suelo blando y plástico definido en las muestras como limo plástico en su mayoría entre mayor sea la profundidad aumenta el porcentaje arena, adicional arcillas de alta plasticidad entre los rangos de A-4, A-7-5, A-7-6, como presenta varias curvas para hacer un modelo estratigráfico en Degtra, se realizó una función de transferencia quedando resuelta en la figura 9.

Figura 9.

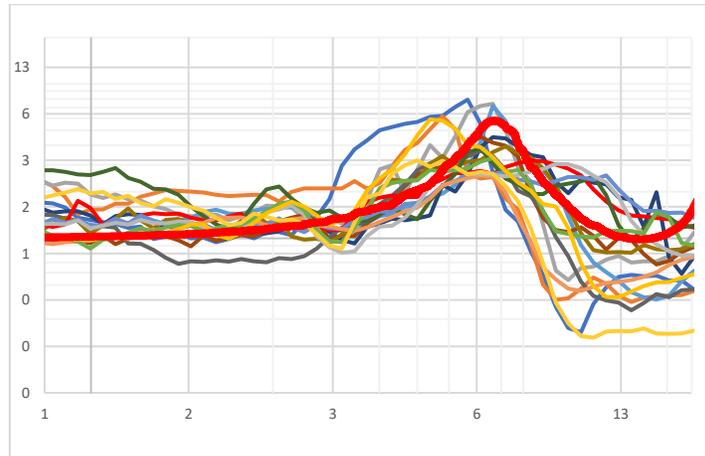
Comparación de espectros de la familia 3 con la respuesta del modelo estratigráfico del sitio (línea roja).



- 5- Familia 4 (6.0 Hz - 7.0 Hz): Se ha identificado esta familia por tener una mayor cantidad de curvas con un pico de amplitud definido entre las frecuencias de 5.50 Hz (0.1 s) a 7.0 Hz (0.1 s), alcanzando amplitudes de hasta 6 veces su valor. Mediante el análisis de laboratorio se determinó que los suelos en este grupo presentan características mecánicas similares a las de la familia 3, con una diferencia en densidad específica promediada de 2.62 g/cm^3 . Estos valores indican un comportamiento de suelo blando y plástico, compuesto mayormente por limo plástico a arcilla, adicional la meteorización en rocas se presentan por fracturas conjugadas por donde los fluidos meteorización en mayor profundidad la roca. Dado que esta familia cuenta con varias curvas de respuesta, se realizó una función de transferencia basada en un modelo estratigráfico del sitio, cuya respuesta se muestra en la Figura 10.

Figura 10.

Comparación de espectros de la familia 4 con la respuesta del modelo estratigráfico del sitio (línea roja).



6- Familia 5 (7.0 Hz): El análisis revela que la familia 5 exhibe un comportamiento interesante en el rango de frecuencias de 0.8 Hz hasta 7.90 Hz, con amplificaciones por debajo de 2.50, lo que sugiere la presencia de un perfil geológico caracterizado por una baja amplificación. Sin embargo, a partir de los 8.0 Hz, se observa un aumento en las amplificaciones, lo que indica la existencia de cambios significativos en la estructura geológica en esa zona, sin embargo, no cuenta con suficiente información estratigráfica más allá de 4 metros de profundidad para realizar modelos. la función de transferencia se muestra en la figura 11.

Figura 11.

Comparación de espectros de la familia 4 con la respuesta del modelo estratigráfico del sitio (línea roja).

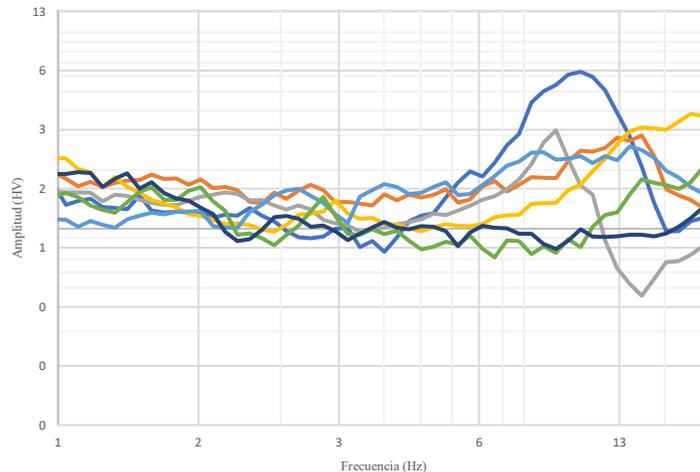


Figura 12.

Mapa con los isoperiodos de respuesta de los suelos estudiados

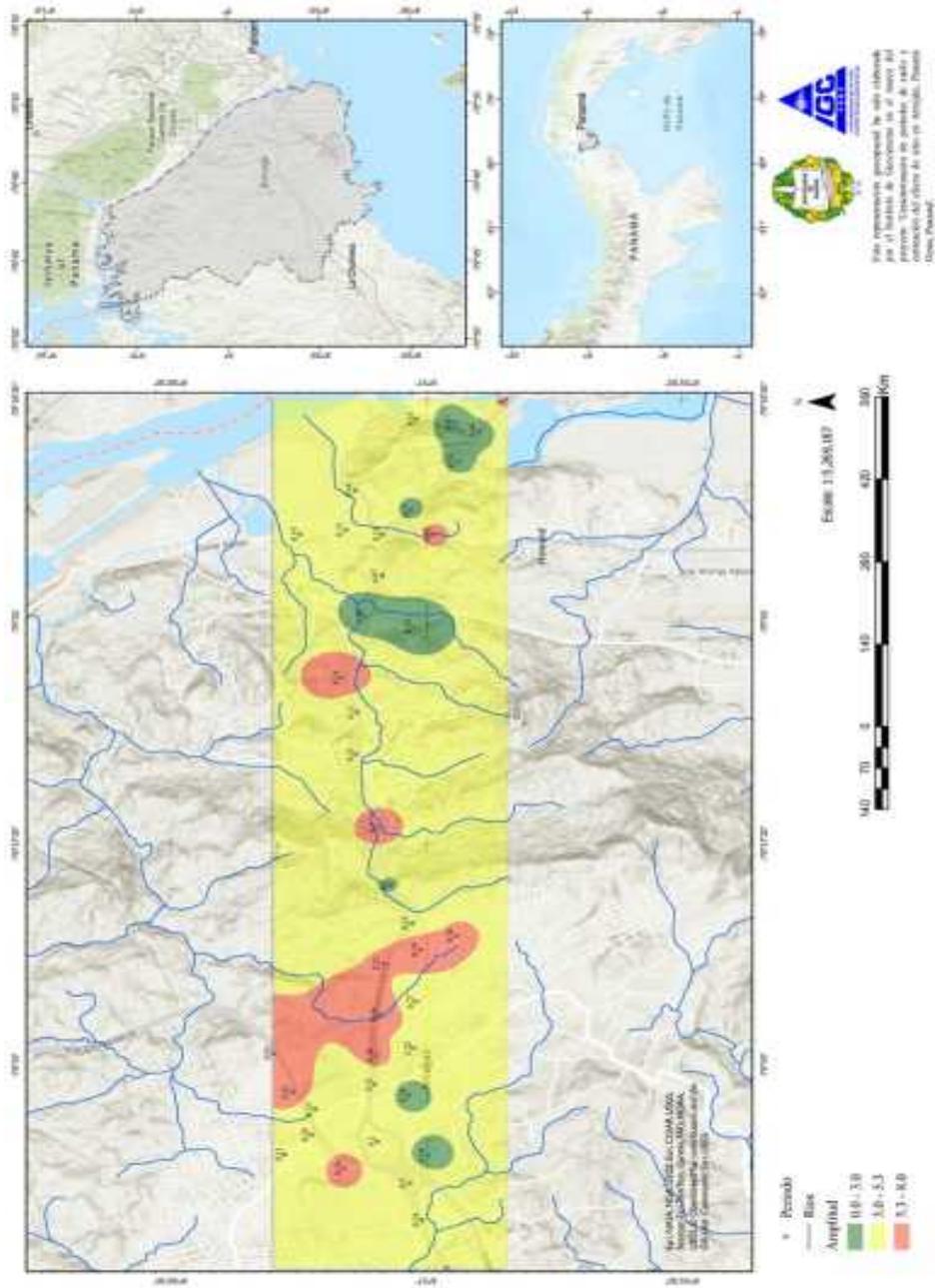


Tabla 1.
Coordenadas y parámetros de los puntos de medición

x	y	Nombre	Amplitud (H/V)	Periodo
-79.654893	8.96082042	PP-1	3.7	0.2
-79.657784	8.96113837	PP-2	4.3	0.2
-79.659993	8.96379591	PP-3	4.0	0.2
-79.653002	8.96308326	PP-4	6.7	0.2
-79.64865	8.96490311	PP-5	6.3	0.1
-79.661583	8.95796667	PP-6	6.2	0.3
-79.66325	8.95158333	PP-7	5.1	0.3
-79.667421	8.950393	PP-8	4.5	0.1
-79.6728	8.94801667	PP-9	3.0	0.1
-79.660132	8.949788	PP-10	1.7	0.2
-79.658541	8.954728	PP-11	4.2	0.2
-79.653288	8.95165105	PP-12	1.6	0.2
-79.65208	8.955014	PP-13	4.4	0.2
-79.648781	8.95482	PP-14	6.1	0.5
-79.648017	8.95117057	PP-15	3.7	0.2
-79.644237	8.954516	PP-16	7.9	0.2
-79.642782	8.950913	PP-17	3.3	0.3
-79.636913	8.950586	PP-18	7.1	0.1
-79.635336	8.94703108	PP-19	5.4	0.3
-79.62967	8.95365584	PP-20	2.8	0.2
-79.633925	8.951391	PP-21	3.8	0.2
-79.638472	8.954195	PP-22	5.4	0.2
-79.610148	8.956733	PP-23	3.2	0.1
-79.606253	8.958219	PP-24	7.9	0.1
-79.599334	8.955839	PP-25	1.9	1.1
-79.600482	8.95118	PP-26	2.0	0.2
-79.590124	8.949325	PP-27	6.1	0.2
-79.590112	8.954255	PP-28	3.2	0.1
-79.58961	8.957806	PP-29	4.5	0.2
-79.594761	8.954293	PP-30	3.3	0.1
-79.6149	8.956843	PP-31	3.2	0.2
-79.623209	8.954636	PP-32	5.8	0.2
-79.585135	8.956895	PP-33	3.9	0.1
-79.590119	8.962275	PP-34	3.8	0.2

-79.577085	8.95095452	PP-35	3.1	0.1
-79.577475	8.94721823	PP-36	2.6	0.1
-79.578442	8.944811	PP-37	2.7	0.1
-79.581855	8.94689741	PP-38	2.9	0.1
-79.574888	8.94215565	PP-39	5.7	0.7
-79.58742	8.95144504	PP-40	2.6	0.2

CONCLUSIONES

- Se establecieron cinco (5) grupos de familias espectrales en el área de estudio: Familia 1 (0.8 Hz a 2.5 Hz) amplificación 6; familia 2 (2.5 Hz a 4.0 Hz) amplificación > 6; familia 3 (4.0 Hz a 6.0 Hz) amplificación > 5; familia 4 (6.0 Hz a 7.0 Hz) la cual mostró dos regiones de amplificación una de 6 y la otra de 3 y; familia 5 (> 7.0 Hz) amplificaciones < 3.
- Las familias espectrales predominantes fueron la familia 3 y la 4. A estas se aplicó el modelo estratigráfico con base a ensayos MASW.
- Del análisis de los cocientes espectrales H/V se obtuvieron los periodos dominantes de los suelos y la amplificación, que permitieron elaborar un mapa de isoperiodos para la zona de estudio. Las zonas rojas (más vulnerables), corresponde a mayor amplificación de las ondas, se correlacionaron con suelos blandos, en su mayoría compuestos por limos y arcillas plásticas, roca muy fracturada disgregable, por lo general son zonas bajas, donde se acumulan sedimentos.
- Las zonas verdes (menos vulnerables), corresponden a baja amplificación de las ondas sísmicas, se correlacionaron con suelos con menor espesor de suelo y una roca dura RH-2 a RH-3, en lugares de colinas de poca altitud donde aflora roca, estratos rocosos superficiales.
- La tipología de las muestras recolectadas en campo en la zona tiene una clasificación granulométrica de suelos finos pasando más del 85% por el tamiz #200.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Benito Oterino, B. (2013). *Geología, Terremotos y Riesgo Sísmico: Avances y Perspectivas*. Encuentros multidisciplinares No 45, Universidad Autónoma de Madrid, <http://www.encuentros-multidisciplinares.org/Revistan%BA45/Be1%E9n%20Benito.pdf>
- Campillo, M., Gareil J.C., Aki, K., & Sanchez-Sesma, F.J. (1989). [Destructive strong ground motion in Mexico City: Source, path, and site effects during great 1985 Michoacán earthquake](#) Bull. Seismo. Soc. of America 79 (6), 1718-1735

- Coban, K. H. (2024). Seismic site classification based on H/V spectral ratio from strong ground motion records: The urban areas of Bursa province. *Journal of Seismology*, 28(2), 321-344. <https://doi.org/10.1007/s10950-024-10206-7>
- Cowan, H., Machette, M. N., Haller, K. M., & Dart, R. L. (1998). *Map and Database of Quaternary Faults and Folds in Panama and Its Offshore Regions* (p. 43). https://pubs.usgs.gov/of/1998/ofr-98-0779/OFR-98-779_508.pdf
- De León, M. J. (2023). La dinámica del espacio urbano en Panamá. variabilidad, crecimiento o desarrollo causas y consecuencias. *Cátedra*, 20, Article 20. <https://doi.org/10.48204/j.catedra.n23.a4189>
- ESRI. (2021). *How IDW works—ArcGIS Pro | Documentation*. ArcGIS PRO. <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/2.9/tool-reference/3d-analyst/how-idw-works.htm>
- INEC. (2023). Superficie, población y densidad de población en la República, según provincia, comarca indígena, distrito y corregimiento: *Censos de 2000, 2010 y 2023* (p. 19). Instituto Nacional de Estadística y Censo. <https://www.inec.gob.pa/archivos/P0705547520231109105354CUADRO%2010.pdf>
- Johnson, R. B., & DeGraff, J. V. (1988). *Principles of Engineering Geology*. Wiley.
- Lermo, J., & Chávez-García, F. J. (1994). Are microtremors useful in site response evaluation? *Bulletin of the Seismological Society of America*, 84(5), 1350-1364. <https://doi.org/10.1785/BSSA0840051350>
- Nakamura, Y. (2000). Clear identification of Fundamental idea of Nakamura's technique and its applications. *The 12th World Conference on Earthquake Engineering*.
- Nakamura, Y. (2019). What Is the Nakamura Method? *Seismological Research Letters*, 90(4), 1437-1443. <https://doi.org/10.1785/0220180376>
- Rivas Orellana, G. E. (2024). *Metodología para validar resultados de razones espectrales H/V considerando variabilidad espacial y temporal en un sitio*. <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/203741>
- SESAME. (2004). *Guidelines for the implementation of the H/V spectral ratio technique on ambient vibrations measurements, processing and interpretation*. https://www.researchgate.net/publication/235623175_Guidelines_for_the_implementation_of_the_HV_spectral_ratio_technique_on_ambient_vibrations_measurements_processing_and_interpretation

- Tallini, M., Morana, E., Guerreiro, V., Di Giulio, G., & Vassallo, M. (2024). Seismic Microzonation Mapping for Urban and Land Sustainable Planning in High Seismicity Areas (L'Aquila Municipality, Central Italy): The Contribution of 2D Modeling for the Evaluation of the Amplification Factors. *Sustainability*, *16*(8401), 23.
- Toala, D. D., Frau, C. D., & Maldonado, N. G. (2024). Cociente espectral H/V: Una herramienta para la microzonificación sísmica de la zona urbana de la ciudad de Manta - Ecuador. *AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)*, *AJEA 37*, Article AJEA 37. <https://doi.org/10.33414/ajea.1737.2024>
- Nakamura, Y. (2019). *What Is the Nakamura Method?* *Seismological Research Letters* (2019) 90 (4): 1437–1443. <https://doi.org/10.1785/0220180376>
- Sandoval, V. H., & Vera, M. J. (2013). *Estudio de la robustez de la Estimación espectral de la Técnica H/V de Nakamura para estudios de caracterización dinámica de suelos*. Tesis licenciatura , Universidad Austral de Chile, Valdivia. Recuperado el Junio de 2024, de <http://cybertesis.uach.cl/tesis/uach/2013/bmfcis218e/doc/bmfcis218e.pdf>
- Schmidt, D. (2016). *Aplicación de la técnica H/V en distintos emplazamientos a partir de la medición de vibraciones ambientales y sismos*. San Pedro de Montes de Oca: Revista Geológica de América Central.
- Ulloa, R. (2018). *Aplicación del método de Nakamura H/V, para estudiar el riesgo sísmico en la zona comprendida por el despliegue de estaciones IMAD*. Concepción, Chile.



Uso de grabadoras de sonido para documentar la diversidad biocultural de la Avifauna de las Tierras Altas Colectivas Emberá de Balsa, Darién, Panamá

Use of sound recorders to document the biocultural diversity of the Avifauna of the Emberá Collective High Lands of Balsa, Darién, Panama

¹ Catherine Potvin

McGill University, Department of Biology, Canada.

cathehrine.potvin@mcgill.ca

<https://orcid.org/0009-0009-6516-6144>

Héctor Barrios

Universidad de Panamá, Maestría en Entomología, Panamá.

hector.barriosv@up.ac.pa

<https://orcid.org/0000-0002-0542-1731>

²Katia Forgues

McGill University, Department of Biology, Canada.

katia.forgues@gmail.com

<https://orcid.org/0009-0007-2094-6396>

Heather M. Gray

Investigador Independiente, Montréal, Canada.

grahm@hotmail.com

<https://orcid.org/0000-0003-0587-8755>

Matthias Kunz

Helmholtz GFZ German Research Centre for Geosciences, Remote Sensing and Geoinformatics Section, Telegrafenberg, Potsdam, Germany.

matthias.kunz@gfz.de

<https://orcid.org/0000-0002-0541-3424>

W. Douglas Robinson

Oregon State University, Corvallis, Department of Fisheries, Wildlife and Conservation Sciences, Estados Unidos

douglas.robinson@oregonstate.edu

<https://orcid.org/0000-0003-2240-0606>

Sandra Mueller

University of Freiburg, Faculty of Biology, Geobotany, Schaezlestr. 1, D-79104 Freiburg, Germany.

sandra.mueller@biologie.uni-freiburg.de

<https://orcid.org/0000-0003-4289-755X>

¹ Smithsonian Tropical Research Institute, Panamá.

² Smithsonian Tropical Research Institute, Panamá.

Fecha de recepción: 2 de abril de 2025

Fecha de aceptación: 7 de mayo 2025

DOI: <https://doi.org/10.48204/j.tecno.v27n2.a7672>

RESUMEN

El Darién de Panamá, es uno de los últimos bosques fronteras del mundo. los Pueblos Indígenas desempeñan un papel fundamental como administradores de bosques intactos y Darién no es una excepción. Aquí utilizamos grabadoras de sonido para documentar la comunidad de aves. La identificación de aves fue realizada por Euclides Campos, panameño y guía de aves, así como Doug Robinson, ornitólogo conocedor de la avifauna de Panamá. Retuvimos solo las especies reportadas por ambos coautores. El análisis de los cantos de las aves fue complementado con observaciones hechas por técnicos Emberá en transectos de 1Km. El análisis de los cantos de las aves permitió identificar sonidos de especies. Esto a su vez nos permitió calcular la riqueza de especies. Las curvas de acumulación de especies se generaron agrupando todas las grabadoras, separando las estaciones seca y húmeda. Se agruparon las especies de aves según sus preferencias alimenticias. Se realizó un análisis de correspondencia en las comunidades de aves por sitio para determinar si las comunidades de aves diferían en el paisaje muestreado. La lista de aves obtenidas sirvió para estimular el debate en torno a los poseedores del conocimiento tradicional Emberá sobre aves. La información sobre conocimientos tradicionales de aves fue validada en una reunión con autoridades tradicionales de la región de Balsa (Cacique regional, el presidente del Congreso y los seis Nokos) y hombres y mujeres (40 personas). Una motivación de los Emberá al unir fuerzas con nosotros es documentar y mostrar su éxito en la conservación del bosque. Mientras el mundo enfrenta una sexta crisis de extinción masiva, el pueblo Emberá del río Balsa convive con el bosque de una manera pacífica.

PALABRAS CLAVE

Darién, aves, diversidad biocultural, paisaje sonoro.

ABSTRACT

The Darién region of Panama is one of the world's last frontier forests. Indigenous peoples play a critical role as stewards of intact forests, and Darién is no exception. Here, we used sound recorders to document the bird community. Bird identification was performed by Euclides Campos, a Panamanian bird guide, and Doug Robinson, an ornithologist knowledgeable about Panama's avifauna. We retained only the species reported by both co-authors. The analysis of bird songs was complemented by observations made by Emberá technicians along 1-km transects. The analysis of bird songs allowed us to identify species sounds. This, in turn, allowed us to calculate species richness. Species accumulation curves were generated by pooling all recorders, separating the dry and wet seasons. Bird species were grouped according to their food preferences. A correspondence analysis was performed on bird communities by site to determine if bird communities differed across the sampled landscape. The bird list obtained served to stimulate discussion among the holders of traditional Emberá bird knowledge. The information on traditional bird knowledge was validated in a meeting with traditional authorities from the Balsa region (the regional chief, the president of Congress, and the six Nokos) and men and women (40 people). One of the Emberá's motivations in joining forces with us is to document and showcase their success in forest conservation. As the world faces a sixth mass extinction crisis, the Emberá people of the Balsa River coexist peacefully with the forest.

KEYWORDS

Darien, birds, biocultural diversity, soundscape.

INTRODUCCIÓN

El Darién de Panamá, en la unión entre Centroamérica y Sudamérica, alberga ~1,33 millones de hectáreas de diversos hábitats de bosques tropicales (Davis, 1997). La región es parte de un punto de alta biodiversidad global conocido por su notable diversidad ecológica, alto endemismo de especies (Myers et al., 2000) y avifauna única (Angehr, 2010; Ridgely, 1992). Es uno de los últimos bosques fronteras del mundo (Kunz et al., 2022) y la única interrupción (~100 km) en la Carretera Panamericana de ~30.000 km de longitud. En todo el mundo, los Pueblos Indígenas desempeñan un papel fundamental como administradores de bosques intactos (Garnett et al., 2018) y Darién no es una excepción. Es el hogar de tres Pueblos Indígenas: los Emberá, los Kunas y los Wounaans. Sin embargo, en este contexto de extraordinario capital natural y cultural, Darién se ha visto plagado de múltiples rutas de tráfico humano, de armas y de drogas (Darién, 2021). En Darién, como en otros lugares, el comercio ilícito está afectando los derechos de los Pueblos Indígenas, a través de presiones sobre sus recursos naturales y su cultura (van Uhm & Grigore, 2021). Sin opciones de desarrollo alternativo basado en los servicios ecosistémicos, estos importantes bosques, el patrimonio cultural y la rica fauna que albergan podrían verse comprometidos.

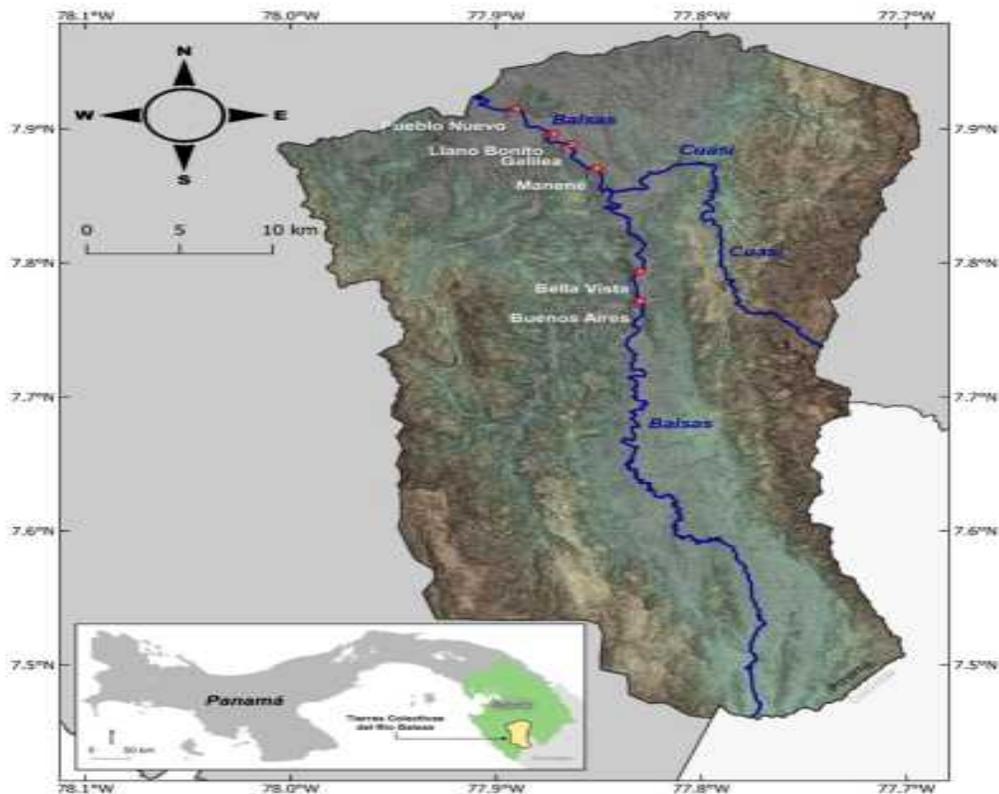
Los habitantes tradicionales más numerosos de los bosques del Darién son los Emberá. Algunos viven en un territorio autónomo conocido como comarca, mientras que otros aún esperan el título colectivo legal de sus tierras ancestrales. Algunas comunidades Emberá están ubicadas dentro del Parque Nacional Darién creado en 1980 para proteger la biodiversidad única del Darién. El Parque Nacional Darién es el parque nacional más grande de Centroamérica y fue declarado Reserva de la Biosfera por la UNESCO en 1983. Dentro de este parque se encuentran las tierras tradicionales del pueblo Emberá a lo largo del río Balsa. Hay seis comunidades Emberá en el río Balsa. (Figura 1). Estas comunidades componen las Tierras Colectivas Emberá de Balsa (TCEB) que se extienden hasta la frontera con Colombia. El presente estudio de la avifauna es parte integral del proyecto *Bacurú Drõa* (Bosques Antiguos en Emberá) desarrollado con las comunidades Emberá y Autoridades Tradicionales de las TCEB para mejorar la comprensión de la ecología en los bosques antiguos mientras se encuentran nuevas oportunidades para la economía local. En *Bacurú Drõa* el monitoreo forestal es realizado por técnicos Emberá capacitados quienes entonces reciben un salario para sus trabajos científicos. Debido a las dificultades inherentes a la observación de la vida silvestre en una densa selva tropical, confiamos en el muestreo acústico pasivo, un método que está ganando impulso para el estudio de las aves en el campo (Darras et al., 2019).

MATERIALES Y MÉTODOS

Entre enero y julio de 2019, se instalaron siete grabadoras de paisajes sonoros (BAR, V2.99, Frontier Labs, Australia) en bosques intactos. Antes de su instalación en el campo, las grabadoras fueron etiquetadas como BAR002-BAR008. Dos grabadoras (BAR002-BAR003) fueron instaladas a lo largo del río Cuasi mientras que las otras cuatro se ubicaron al sur de Manené a lo largo de 30 km del río Balsas (Figura 1). Las grabadoras fueron programadas para registrar sonidos durante 1 minuto cada 10 minutos por un período de dos meses en dos estaciones. Fueron instaladas por técnicos Emberá en sitios identificados por los poseedores de conocimientos Emberá y las autoridades tradicionales como bosques antiguos.

Figura 1.

Mapa de las Tierras colectivas Emberá de Balsa (TCEB) con los dos ríos principales a los lados de los cuales hemos establecido las grabadoras. Las seis comunidades están indicadas en el mapa. El fondo del mapa muestra las curvas de nivel y el cuadrito la ubicación de las TCEB dentro de Panamá



El análisis de fitolitos confirmó que los sitios elegidos eran efectivamente bosques antiguos (Kunz et al., 2022). Aquí utilizamos las grabaciones para documentar la comunidad de aves del Darién. Para ello, se tomaron submuestras de los archivos de audio seleccionando dos días en la temporada seca (26 de enero y 14 de febrero) y dos días al inicio de la temporada húmeda (22 de mayo y 19 de junio) en los cuales todas las grabadoras tenían sonidos y poca interferencia del viento o la lluvia. Debido a que las aves tienden a estar más activas temprano y tarde en el día, concentramos nuestros esfuerzos de identificación entre las 5h:30 y las 9h:00 y entre las 16h:00 y las 19h:30 para un total de 192 horas de muestreo. La identificación de aves fue realizada de forma independiente por Euclides Campos (EC), panameño y guía experimentado en aves, así como Doug Robinson (DR), un ornitólogo con décadas de trabajo de campo con la avifauna de Panamá. Aquí solo tuvimos las especies reportadas por ambos coautores para el mismo intervalo de tiempo y ubicación.

El análisis de los cantos de las aves fue complementado con observaciones directas hechas por los coautores Andres Casamá, Delfino Olea y Irving Salazar. Usando el sitio de cada grabadora como punto de partida se establecieron, en enero 2019, 7 transectos de 1 km con paradas de observaciones marcadas en el campo a cada 50 m. Los técnicos recorrieron estos transectos temprano en la mañana, cada mes hasta agosto caminando lentamente y parándose a cada 50 m anotando las especies observadas. Concentrándose en las especies de interés para la conservación en particular los guacamayos, el pavón norteño, *Crax rubra*, y la pava cojolita, *Penelope purpurascens*. Cada técnico esta responsable de muestrear 2 o 3 transectos con un tiempo de observación promedio 86.7 ± 30.7 minutos.

El análisis de los cantos de las aves nos permitió identificar sonidos de especies, pero no de individuos dentro de una especie. Esto a su vez nos permitió calcular la riqueza de especies, pero nos impidió calcular índices de diversidad. Las curvas de acumulación de especies se generaron agrupando todas las grabadoras, pero separando las estaciones seca y húmeda. Para proporcionar más información sobre la ecología de la avifauna, se agruparon las especies de aves según sus preferencias alimenticias (grupos tróficos). Los grupos tróficos incluyeron aves de rapiña (depredadores), frugívoros, granívoros, herbívoros, insectívoros, nectarívoros y omnívoros utilizando (Angehr GR, 2010) complementada con un archivo ecológico de atributos de alimentación (Wilman et al., 2014) así como información proporcionada por el sitio *eBird* de la universidad Cornell. Seguimos a (Wilman et al., 2014) quienes cuantificaron los hábitos alimenticios por proporción, que simplificamos para asignar cada especie de ave a un solo grupo. Por ejemplo, las especies caracterizadas como 60% frugívoras y 40% insectívoras se convirtieron en “omnívoras”. Teniendo en cuenta que es posible que las especies no siempre tengan acceso a su fuente de alimento preferida, las aves que mostraban una preferencia alimentaria del 70% o más se clasificaron según el tipo de alimento dominante: p.e. El 70% de los insectívoros y el 30% de las rapaces fueron asignados a la categoría de "insectívoros" (Tabla 1). Además, recopilamos información sobre su estado de conservación, incluida la distribución geográfica restringida identificada por mapas electrónicos de aves, categorías de la UICN y falta de informes existentes en la lista de aves del Parque Nacional Darién (Clements, 2023).

Se realizó un análisis de correspondencia (CA) en las comunidades de aves en cada sitio de registro para determinar si las comunidades de aves diferían en el paisaje muestreado. La matriz de entrada fue la presencia y ausencia de cada especie o género de aves en cada grabadora. Para comprender si los grupos tróficos de las aves estaban influenciados por las características del paisaje o del bosque, llevamos a cabo un análisis de redundancia (RDA). La matriz de la variable dependiente consistió en el número de especies de aves en cada grupo trófico en cada sitio de registro. La matriz explicativa incluyó variables geográficas y botánicas descritas a continuación. Las variables geográficas incluyeron las coordenadas GPS de cada una de las grabadoras, lo que permitió caracterizar el lugar donde fueron posicionadas, así como la distancia (m) de las grabadoras a: los campos agrícolas más cercanos, a los ríos Balsa o Cuasi, y al pie de montañas con cimas de al menos 600 m de altura. La elevación en el lugar de las grabadoras se obtuvo a partir de un mapa de elevación digital (Panamá DEM 30 m, JAXA). Las variables botánicas se derivaron de datos de parcelas forestales de 30 m por 30 m (Kunz et al., 2022) establecidas a una distancia que oscilaron entre 56 m y 1057 m de los sitios de registro (Tabla 1). Además, el estudio considera siete variables biológicas: diámetro medio de los árboles a la altura del pecho-DAP, altura media de los árboles, altura media de las parcelas estimada por LiDAR terrestre, número de árboles, número de árboles con DAP > 50 cm, número de especies de árboles y presencia de *Dipteryx oleifera* Benth, una especie de árbol conocida por ser una fuente de alimento esencial para *Ara ambiguus*, guacamayo ambiguo (Chassot, 2012). Para seleccionar las variables de la matriz explicativa, primero realizamos un análisis de correlación entre variables geográficas y biológicas. Ninguna de las variables geográficas estuvo significativamente correlacionada, por lo que todas se retiraron en la matriz explicativa. Por el contrario, algunas variables biológicas se correlacionaron significativamente y, por lo tanto, se excluyeron de la matriz explicativa. La escala de especies (2) se utilizó en CA y RDA, mientras que en este último las variables explicativas se seleccionaron mediante selección hacia adelante (forward selection). Los análisis estadísticos se realizaron con el paquete Vegan in R (Oksanen, 2019).

La lista de aves establecida a partir de las grabadoras sirvió para estimular el debate en torno a los poseedores del conocimiento tradicional Emberá sobre aves. Se utilizaron como referencia ilustraciones de la versión en español de *The Birds of Panamá* (Ridgely, 1992). Uno de los coautores, Alexis Ortega (AO), utilizó un formato de discusión abierta para hablar con tres poseedores de conocimientos tradicionales Emberá de las aves, en particular sus nombres (certificado ético McGill 22-01224). Dos de los poseedores de conocimientos tradicionales fueron los coautores Juvencio Guaynora y Juanico Ortega,

quienes observaron las láminas y dieron un nombre Emberá, si lo conocían, a las especies escuchadas en las grabaciones (resaltadas en amarillo en el libro) y a todas las demás especies. Durante este proceso, los dos poseedores del conocimiento y AO también discutieron y analizaron la importancia cultural de las aves, particularmente los aspectos relacionados con la caza y la recolección. Los coautores AO y Catherine Potvin (CP) también

se reunieron con una poseedora de conocimiento tradicional Emberá, la coautora Adriana Mezua (AM). Al ver las ilustraciones del libro de Ridgely, AM proporcionó un rico conocimiento relacionado con las aves importantes para las mujeres con fines culturales. La información sobre conocimientos tradicionales de aves fue validada en una reunión con las 8 autoridades tradicionales de la región de Balsa es decir el Cacique regional, el presidente del Congreso y los seis Nokos (jefes de una comunidad) así como de una audiencia del pueblo, hombres y mujeres de unas 40 personas. La reunión validó la información de los cuentos y creo una comisión para validar los nombres en Emberá. Esta comisión se reunió en enero 2025 con el Noko de Manene, Francisco Solís. El Emberá es un idioma oral sin una ortografía consensuada. Los conocimientos Emberá sobre aves (Kane, 2015) usa una ortografía fonética para presentar los nombres Emberá. Dado que el presente artículo quiere ser relevante para los mismos Emberá decidimos utilizar la ortografía consensuada con las autoridades tradicionales.

RESULTADOS

En los cuatro días analizados (26 de enero - 14 de febrero - 22 de mayo -19 de junio), las grabadoras captaron 7217 fragmentos sonoros identificados como vocalizaciones de aves. De estos fragmentos de sonido, los coautores EC y DR identificaron de forma independiente 5,357 fragmentos sonoros que conservamos para su posterior análisis. Estos fragmentos de sonidos representan 172 especies. Las curvas de acumulación de especies, analizadas, indicaron que los cuatro días de registro en siete sitios fueron suficientes para alcanzar el número asintótico de especies tanto en la estación seca como en la húmeda. Observamos separación tanto estacional como diaria en la aparición de especies. Se escucharon 30 especies de aves sólo durante la estación seca y 35 especies sólo durante la estación húmeda. A lo largo de las estaciones, se escucharon 48 especies solo por la mañana. Se escucharon 5 especies solo al final del día, a saber: *Cnipodectes subbrunneus*, *Megascops centralis*, *Monasa morphoeus*, *Psarocolius guatimozinus* y *Herpetotheres cachinnans*.

El número de especies de aves identificadas por sitios de registro individual varió desde un máximo de 108 especies en BAR002 hasta un mínimo de 84 especies en BAR006 (Figura 2). Las cuatro grabadoras con el mayor número de especies escuchadas (94 a 108 especies) también registraron un mayor número de sonidos (859 a 1095 sonidos). El Análisis de Correspondencia (CA) sobre la composición de la comunidad explicó el 42% de la variación espacial en los sonidos de las aves. La ilustración (biplot) muestra que la composición de las comunidades de aves para dos grabadoras BAR004 y BAR008 son diferentes de las otras cinco (Figura 3). Sólo en estas grabadoras se encontraron veinticuatro especies, incluida *Pheugopedius spadix* una especialidad de Darién. Entre las especies registradas, la especie *Amazona farinosa* es la más escuchada, presente en 383 observaciones. En particular, una especialidad del Darién, la paloma *Patagioenas plumbea*, con 163 observaciones, se encuentra entre el 5% de las especies registradas con mayor frecuencia. Los bosques donde se instalaron las grabadoras también difieren en las características de la vegetación cercana. La diversidad de árboles fue especialmente alta en BAR007, equivalente a 244 especies por

hectárea (Tabla 1). Los árboles fueron los más grandes cerca de BAR004 y BAR008 con un DAP medio > 40 cm. Se midieron árboles con DAP > 50 cm en cada sitio y cinco de los sitios incluyeron árboles con DAP > 2 m, siendo las excepciones BAR007 y BAR003. El más grande de estos árboles, *Clarisia biflora* Ruiz & Pav., medía 2.87 m de DAP. El almendro de montaña, *Dipteryx oleifera*, estuvo presente en dos parcelas forestales, el más grande medía 2.28 m DAP. El coeficiente de correlación de Pearson mostró que el DAP medio de los árboles está fuertemente correlacionado positivamente con el número de árboles con DAP > 50 cm ($r=0.88$), pero también que el DAP medio estaba fuertemente correlacionado negativamente con el recuento total de árboles ($r=-0.84$). También se encontró una correlación negativa significativa entre el número de árboles y el número de árboles > 50 cm ($r=-0.90$).

Tabla 1.

Características geográficas y botánicas del bosque en las proximidades de las siete grabadoras. Debido a que escuchamos varias especies en peligro de extinción, decidimos no revelar la posición exacta de las grabadoras. Las grabadoras BAR002-003 se ubicaron a lo largo del río Cuasi y los demás a lo largo del río Balsa al sur de la comunidad de Manene. La altura de la parcela TLS es la medida de la altura media de los árboles mediante un escáner láser terrestre en una parcela de 30 m por 30 m. Abreviaciones: Dist: Distancia, DA: (diámetro a altura de pecho, Num: número, ELT: escáner láser terrestre.

	8 BAR00	4 BAR00	7 BAR00	5 BAR00	6 BAR00	2 BAR00	3 BAR00
Variabes Geográficas							
Dist grabador a parcelas (m)	1057	56	80	605	756	658	785
Elevación (m)	163	131	122	212	179	163	212
Dist al río (m)	172	509	1290	949	858	1525	380
Dist a campos cultivos (m)	117	320	470	919	741	2927	2479
Dist al pie de montañas (m)	3798	3771	2881	5134	7004	2834	2654
Variabes Biológicas							
Promedio DAP	46.47	42.47	24.49	38.52	26.94	31.75	38.61
Promedio altura de árbol	26.79	22.39	20.55	24.40	23.26	21.64	24.09
Num de arboles	55.00	66.00	94.00	57.00	90.00	61.00	66.00

Árbol >50 cm	14.00	13.00	8.00	13.00	5.00	11.00	11.00
presencia <i>Dipteryx</i>	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	1.00
Diversidad de arboles	32.00	32.00	44.00	32.00	31.00	30.00	28.00
Altura de parcela ELT	32.37	36.60	31.84	27.35	37.68	38.68	29.26

Figura 2.

Número de especies identificadas en función de los sonidos de las aves identificadas en cada uno de los siete sitios de muestreo

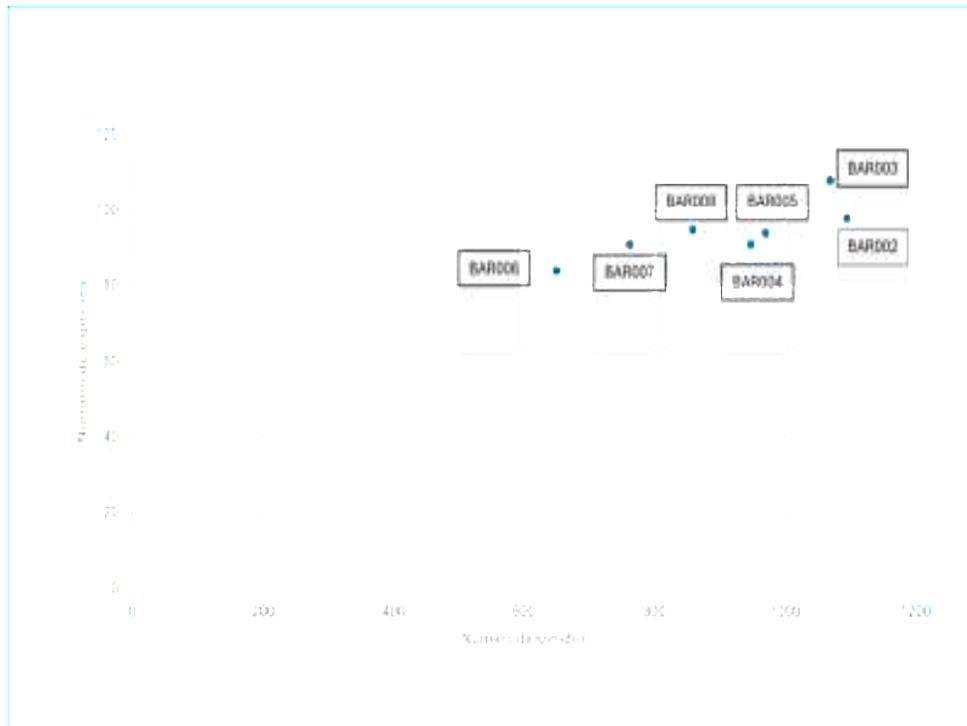
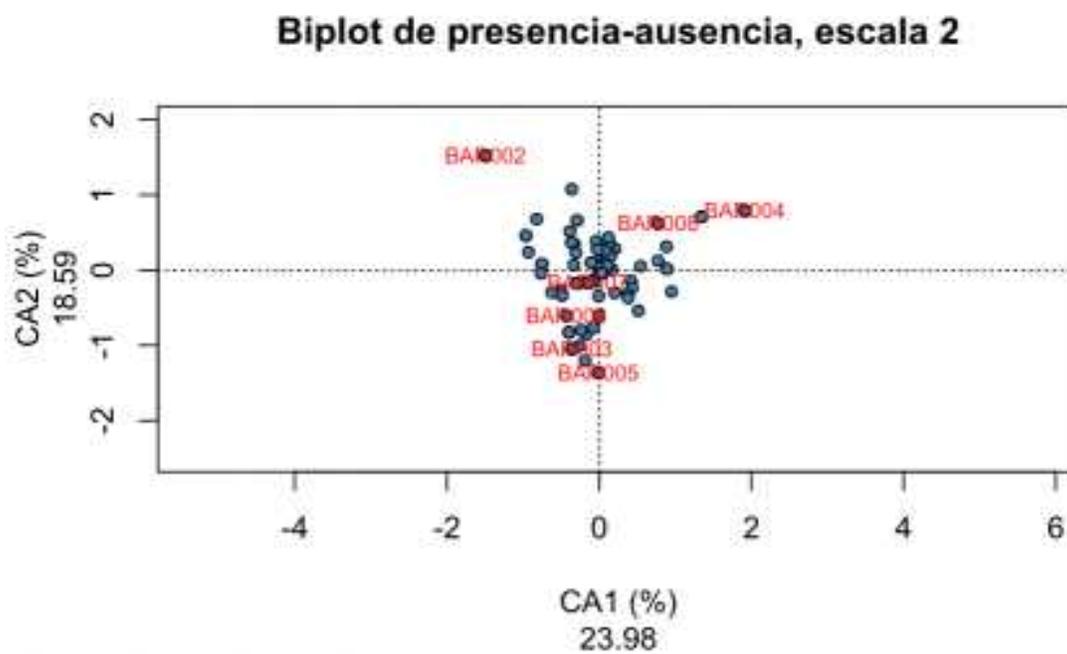


Figura 3.

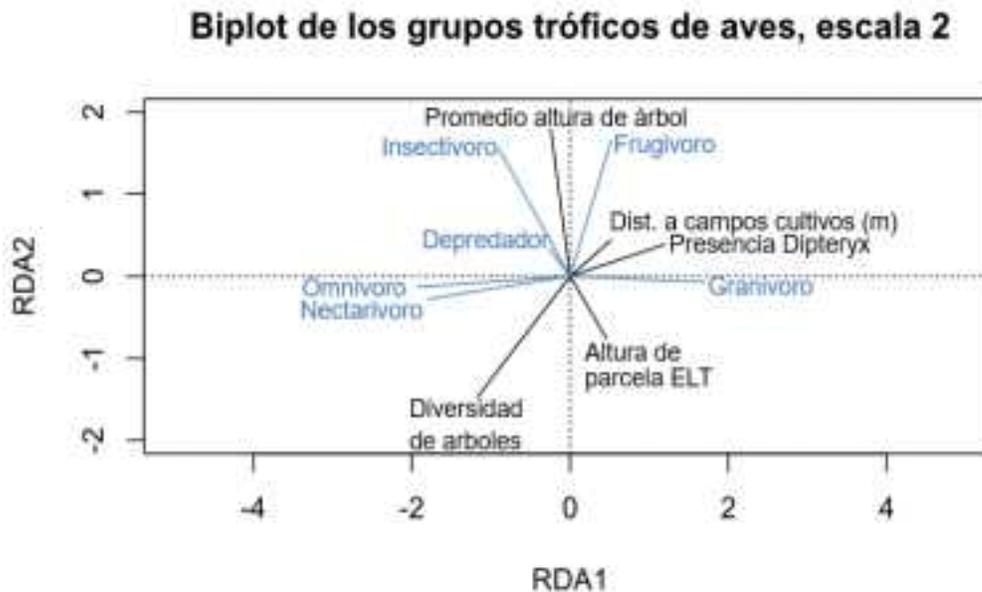
Ilustración biplot de análisis de correspondencia sobre la composición de la comunidad de aves en las siete grabadoras representadas por su nomenclatura. Los puntos azules representan la puntuación canónica de cada especie.



Para proporcionar más información sobre las comunidades de aves, asignamos a las especies su grupo trófico. El grupo trófico más diverso escuchado fue el de los insectívoros con 85 especies registradas, seguido de los frugívoros con 34 especies escuchadas y los nectarívoros (29 especies). Las aves insectívoras incluyeron cuatro especialidades del Darién (*Aphanotriccus audax*, *Myiopagis caniceps*, *Sirystes albogriseus*, *Chlorothraupis olivacea*). Los granívoros fueron los menos diversos con solo dos especies: *Claravis pretiosa* y *Leptotila cassinii*, escuchada solo en BAR008. La selección directa utilizada en RDA para analizar la variación de los grupos tróficos entre las grabadoras mantuvo las siguientes variables explicativas: diversidad de los árboles, altura media de las parcelas, distancia al pie a campos cultivos, así como la presencia o ausencia de *D. oleifera*. El primer eje canónico, que explica el 45.6% de la variación, está determinado en gran medida por la presencia de *D. oleifera* (factor de carga 0.5963) y diversidad de los árboles (factor de carga -0.5847), mientras que el segundo eje, que explica un 23.6% adicional de la variación, está asociado al promedio altura de árbol (factor de carga 0.8950) y la diversidad de los árboles (factor de carga -0.7361). La inspección de la gráfica (Figura 4) muestra que la diversidad de frugívoros e insectívoros se asocia positivamente con una mayor altura de los árboles, mientras que los omnívoros y nectarívoros aparentemente responden a la diversidad de los árboles.

Figura 4.

Biplot de la RDA analizando grupos tróficos de aves versus características geográficas y biológicas. Abreviaciones: Dist. Distancia; Altura de parcela ELT: Altura de parcela mediada con un escanear lidar terrestre.



Debido a su importancia para la conservación, analizamos con más detalle las grabaciones de los tres guacamayos (*Ara severus*, *A. ambiguus* y *A. chloropterus*) y descubrimos que el guacamayo ambiguo (*A. ambiguus*) se escuchaba con más frecuencia que las demás, con 50 fragmentos de sonidos identificados. El guacamayo ambiguo, *A. ambiguus*, se escuchó en todas las grabadoras, tanto en la mañana como en la tarde durante la estación seca y húmeda. Esto contrasta con el *A. severus*, que sólo se escuchó una vez en una tarde de estación seca. El guacamayo *A. chloropterus* se escuchó en ocho grabaciones de cinco sitios diferentes. Además del guacamayo ambiguo, *A. ambiguus*, que se encuentra en peligro crítico de extinción, las especies que preocupan para su conservación son: el pavón, *Crax rubra* (vulnerable), así como el loro *Pyrrhuloxia pyrrhuloxia* y la paloma *Patagioenas plumbea*, ambas clasificadas por la UICN como casi amenazadas (Tabla 2). Los registros de aves incluyeron especies endémicas como el carpintero *Piculus collopterus* (Panamá oriental) y once especies endémicas de la región Choco-Darién, también cuatro especies nuevas para el Parque Nacional Darién (Tabla 2). Las observaciones directas de los coautores AC, DO y IS confirman la presencia de especies de interés para la conservación en todos los sitios de muestreo y a través el tiempo (Tabla 3). En total se observaron 187 guacamayos en 60.6 horas de muestreo. Las observaciones del guacamayo severo son interesantes porque no estaba muy frecuente en las grabadoras. Aquí suponemos que las menciones de guacamayos pequeños se refieren a esta especie lo que haría un total de 30 observaciones.

Tabla 2.

Clasificación de especialidades que incluye distribución geográfica restringida, estado de la UICN y que no están reportado en el check list del Parque Nacional Darién (PND) (Clements 2024).

Especie de ave	Clasificación especial
Cacique negro	Choco-Darién
Mosquero piquinegro	Choco-Darién
Mosquero del Choco	Choco-Darién
Saltarin cabecidorado	Darién y Sur America
Fiofio gris	Choco-Darién
Pavon norteño	UICN Vulnerable
Guacamayo ambiguo	UICN Peligro critico
Tangara olivacea	Choco-Darién
Anambe unicolor	Choco-Darién
Eufonia ventrinaranja	Darién y Sur America
Busardo plumizo	UICN casi amanezado
Paloma plumiza	Darién y Sur America
Mielerito ceruleo	Choco-Darién y Sur America
Vireon cejirrufo	Sin reporte en PND
Guardabosques rojizo	Sin reporte en PND
Lloron picofino	Choco-Darién Sin reporte en PND

Tiluchi alirrofo norteño	Darién y Sur America
Lorito cabecigualdo	Choco-Darién UICN casi amenazado
Sapayoa	Choco-Darién
Tangara cejirroja	Choco-Darién
Cucarachero pechirrayado	Sin reporte en PND
Carpintero panameño	Endemico Panamá este
Cucarachero gorjirrayado	Choco-Darién

Tabla 3.

Observaciones directas hecha en transecto de 1 km empezando en el sitio de las siete grabadoras de sonido. Las observaciones fueron hechas en 2019 y se presentan como la suma por especies de los siete transectos por cada fecha de muestreo. Cuando no se pudo identificar los guacamayos a las especies, por ejemplo, cuando vuelan muy alto, solo se registraron como guacamayos.

	30 ene- 2 feb	23-25 feb	20-22 abril	26-28 mayo	20-22 julio	8-15 agosto	total
Guacamayo aliverde	9	9	4	18	6	6	52
Guacamayo ambiguo	4	11	8	5	12	8	48
Guacamayo severo	4	0	0	0	0	0	4
Guacamayo azuliamarillo	0	0	0	0	0	2	2
Guacamayo	6	4	23	1	5	1	41
Guacamayo grande	7	1	0	2	0	0	10
Guacamayo pequeño	1	8	5	6	4	6	30
Pavon norteño	0	4	17	6	4	3	34
Pava cojolita	0	2	0	5	2	3	12

Los poseedores de conocimiento tradicional Emberá informaron nombres de sesenta especies de aves (Tabla 4). Las familias de aves con el mayor número de especies con nombres Embera fueron los Psittacidae con 7 especies; Trogonidae y Icteridae 4 especies cada una; los Momotidae y Strigidae 3 especies cada una; los Trochilidae, Tyrannidae, Tinamidae, Odontophoridae, Crassidae y Falconidae 2 especies cada una y las Rallidae, Corvidae, Hirundinidae, Bucconidae, Galbulidae, Plioptilidae, Cuculidae, Columbidae, Pipridae, Piciformes, Accipitridae con una especie cada una. Más del 70% de los momótidos, trogones y loros escuchados también tenían un nombre Emberá (respectivamente 75, 78 y 80%). Los tiránidos (Tyrannidae), el más diverso de los grupos de aves escuchados con 26 especies, fueron los menos reconocidos, ya que sólo el 6%

de las especies tenían nombres Emberá. El segundo grupo de especies más amplio en las grabaciones son los tamnofílidos típicos (Thamnophilidae), una categoría que los Emberá no mencionan en gran medida. También notamos la ausencia de nombres Emberá para las Cardinalidae, Troglodytidae y Furnariidae. Los Emberá tienen nombres para especies cuyos sonidos no fueron registrados, por ejemplo, los martines pescadores (Alcenidos) (Tabla 4).

Tabla 4.

Listado de aves con nombre Emberá encontrado en la versión español del libro de Ridgely. Algunos de estas aves se escucharon en las grabadoras, pero otros no.

Nombre español de Ridgely	Nombre Emberá
oropendula crestada	cumbara bocece
cacique lomiescarlata	cumbara kirokiro
martin pescador grande	ansabida wibua
golondrina alirrasposa	badibadi
guacamaya azul y amarilla	bagara cuara
guacamaya verde	bagara pawarra
guacamaya rojas y verde	bagara purru
tucansiyo collarejo	bichi
buho penachudo	bombora
amazona arinoso	kare chiara
amazona frentirojo	kare chijue
bolsero dorsiamarillo	chacoro ogigi
saltarin cabesidorado	chitochito
oropendula negra	cumbara chidroma
soterillo caricafe	dekasera
jacana caruculada	dojeje
garza del sol	furi
rascón-montes cuellegris	gotede
amazilia pechiazul	imbisu pawara
ninfa coronada	imbisu pawara pecho toro
jacamar grande	jaragu
guacamaya frentiscaña	jiwa bagara
monja frentiblanca	jowjow
trogon gorginegro	jowjow jaa cuarabu ocua torobu
trogon colipizarra	jowjow jaa pureabu

trogon colinegro	jowjow jaa pureabu ocua torobu
trogon coliblanco	jowjow pecho cuarabu
momoto coroniazulado	juwdu droma eyadebema caibea
momoto enano	juwdu retrojodebema
momoto piquiancho	juwdu caibe eyadebema
momoto rufo	juwdu droma eyadebema
tucan swaison	kewara ichiara
cuco hormiguero	kidatada eyadebema
loro cabeci azul	michita
harcon-montes barreteado	negimbu gatearo
gabilán cangrejero	neginbu guapipi
martin pescador berdirufo	nunsi ansabida
buho monteado	parru
tucan orejamarilla	patra patra
codorniz jaspeada	porro mulato
mosquero piscudo	pipidi droma
codorniz carrirufa	porraa
tortolita azul	putujo
paloma pechigris	puchira droma
perico barbيرانja	quequerre
tucan pico iris	quewuara quereo
loro cabeci pardo	quewetaca
pavon grande	samoo
tinamu grande	socorro
tinamu chico	sojerru
caracara avispera	tantao
mosquero cabecigris	terotero
urraca pechinegra	tio tio chocho
cuco ardilla piaya cayana	trica
pava grestada	tusii
pava negra	tusii paima
copetón viajero	warra jaramia
buho de anteojos	wemia

Escuchar los sonidos con los coautores Emberá sacó a la luz el hecho de que las aves desempeñan papeles importantes en diferentes aspectos de su cultura. Algunos nombres de árboles Emberá ilustran la relación entre las aves y los árboles. Dos árboles, tusipono (*Schizolobium parahyba* (Vell.) S.F.Blake) y tusineta (*Rinorea squamata* S.F.Blake) reciben ese nombre porque la pava cojolita, *Penelope purpurascens* (tusii en Emberá), se alimenta de sus flores (neppono - flor en Emberá) o frutos (neta en Emberá). Otra especie de árbol, *Allophylus psilospermus* Radlk, se conoce como Kareneta en Emberá, que significa frutos del loro (loro - care en Emberá). Las aves también son importantes para la seguridad alimentaria, ya que se cazan varias especies o se recolectan huevos. La pava cojolita, *P. purpurascens* - tusii, y el pavón norteño, *C. rubra* - samoo en Emberá, son particularmente importantes para los medios de vida de los Emberá. Mientras los cazan, los Emberá también los crían como si fueran pavos. Se aprecian los huevos del *Tinamus major*, socorro en Emberá. En nuestras unidades de registro, las detecciones fueron las más altas para el *T. major* con 133 observaciones identificadas como tal en ambas estaciones y a lo largo del día. Se escuchó en todos los lugares. Con 11 observaciones, el guan, *P. purpurascens*, tuvo una frecuencia más baja pero una alta concordancia entre los dos oyentes (84%). El pavón norteño, *C. rubra*, fue escuchado con menor frecuencia, 8 identificaciones por parte de ambos oyentes en solo dos sitios. Tanto el pavón norteño que la pava cojolita se observaron de manera directa (Tabla 3).

Las aves también están presentes en las creencias espirituales Emberá. Según la tradición, el warra jaramia, un mosquero, visita a las mujeres al inicio del embarazo, a menudo antes de que sepan que están embarazadas, para informarles que están embarazadas. Si el warra jaramia es con una cabeza grande entonces el bebé será un niño mientras que, si el pájaro es con una cabeza pequeña, el bebé será una niña. Las aves desempeñan un papel en la narración, como lo ilustra la historia de la oropéndola (cumbarra) y la iguana (opoga):

Antes los pájaros hablaban. Nadie había visto jamás sonreír a una iguana. Los cumbarra, oropéndola, decidieron triunfar. Para ello empezó a cantar con la cabeza al revés. Opoga, la iguana, se echó a reír porque pensó que el cumbarra se caería.

Según el coautor AM las aves son partes esenciales de los rituales que contribuyen a transferir una característica deseada de una especie a un bebé. El makua, un búho, es una de esas aves. Un niño con la ceremonia tradicional del pájaro makua podría convertirse en un gran cazador porque atraerá a sus presas o se volverá muy atractivo para las mujeres. Un niño, que ha recibido la ceremonia con un pájaro carpintero, sorre en Emberá, será excelente usando un hacha para cortar leña. Los martines pescadores, ansabida en Emberá, brindan al niño el arte de pescar con lanza, chawala en Emberá, mientras que los colibrís, imbisu en Emberá, aseguran que se convierta en una persona trabajadora. Se puede asignar más de un pájaro a un niño y estos rituales se realizan tanto en niños como en niñas.

DISCUSION

Aunque la avifauna de Panamá es bien conocida gracias a extensos estudios realizados en todo el Istmo, hay una notoria ausencia de monitoreo de aves en el sureste de Darién (Miller, 2014). De hecho, la mayor parte del conocimiento de la comunidad ornitológica proviene de observadores de aves que realizan expediciones, algunos de los cuales archivan sus observaciones en *eBird* y partes remotas de Darién, como las TCEB, se consideran en gran medida demasiado peligrosas para los viajes de observación de aves. El acuerdo de cooperación a largo plazo con las TCEB nos permitió iniciar este seguimiento a largo plazo.

En México, los investigadores han comenzado a utilizar cámaras trampa para documentar la diversidad de aves del sotobosque debido a sus características no intrusivas (Santos-Moreno et al., 2019). Aquí elegimos la grabación acústica como técnica de muestreo porque estábamos interesados en comprender la diversidad no sólo de las aves del sotobosque sino también de las del dosel. La lejanía de la región de muestreo dificultó que el equipo de investigación realizara inventarios completos de aves, por lo que la tecnología que podía registrar durante largos períodos de tiempo era eficiente. En el futuro, visualizamos capacitar a técnicos Emberá para estudios ornitológicos, pero las grabaciones acústicas ofrecieron una alternativa factible para comenzar a acumular información sobre la avifauna de la región de Balsa. Al escuchar 192 horas de grabaciones, los coautores ED y DR identificaron 173 especies/géneros, lo cual es ligeramente inferior a la diversidad de aves estimada en 218 especies en el centro de Panamá en la isla Barro Colorado (BCI) con 138 horas de observaciones directas (Robinson, 1999). La grabación acústica obviamente pasa por alto especies que nunca vocalizan o lo hacen fuera de los períodos de tiempo que analizamos. Además, optamos por colocar todas las grabadoras en los bosques, lo que limitó la detección de aves relacionadas con el agua, como el martín pescador. Las listas de aves para BCI y el Parque Nacional Darién mencionadas anteriormente incluían aves acuáticas o playeras que no están en nuestra lista de las TCEB. Un estudio basado en la detección automática de especies en la selva amazónica cerca de Manaus, Brasil, encontró 60 especies de un grupo potencial de 400 especies en 11000 horas de grabaciones (de Camargo et al., 2019). Podemos concluir entonces que nuestro método fue más eficaz.

Kane (2015) proporciona una lista completa de nombres Emberá de aves, así como cuentos y canciones asociadas. Con un 78% de acuerdo, la coherencia entre los nombres ocultos por este autor y los dados por nuestros coautores e informantes es impresionante. Además, nos contaron varias historias, como el papel mágico de los makua, el cuento de los cumbarra y opoga (oropendola e iguana), el hecho de que el sorre (pájaro carpintero) puede ayudar al hombre a usar mejor el hacha o que los warua jaramia (mosqueros) puede informar a las mujeres que están embarazadas, también fueron corroborado por Kane (2015). Estos sugieren que el conocimiento sobre las aves es ampliamente compartido entre la población Emberá a través todo el Darién y es un conocimiento colectivo generalizado. El análisis de Kane (2015) sobre el conocimiento taxonómico Emberá destaca el hecho de que los Emberá reconocen

frecuentemente grupos de aves como los imbisu (Colibríes) mientras que para otros grupos de aves tienen una taxonomía precisa como es el caso de los guacamayos para las cuales el nombre genérico Emberá: bagara está calificado por su color bagara pawarra y bagara purru son respectivamente el *A. ambiguus* así como el *A. chloropterus*. Por respeto al sistema de conocimiento de los Emberá, siempre reportamos los nombres Emberá para designar algunas de las especies para las cuales coincide la clasificación científica y Emberá. Esta práctica es coherente con nuestro compromiso de descolonizar la investigación ornitológica (Thomsen et al., 2023).

El grupo más grande de aves identificadas fueron los insectívoros, incluidos cerca de la mitad de todas las especies, un patrón que se observa generalmente en las comunidades de aves (Sedláček et al., 2023). Los frugívoros son el segundo grupo de aves más escuchado e incluyen frugívoros pequeños como los saltarines, uno de tamaño mediano como las palomas y frugívoros grandes, en particular los bagaras (guacamayos). Este hallazgo es interesante en vista del hecho de que se ha identificado que los grandes frugívoros se ven afectados de manera desproporcionadamente negativa por la fragmentación del bosque (Bregman et al., 2014). Aquí 15 de las 34 especies de frugívoros son animales de gran tamaño: un hallazgo que podría interpretarse como una confirmación de la calidad del hábitat forestal. Además, un análisis espacial del uso de la tierra en las TCEB mostró que gran parte de las 125 000 ha de tierras colectivas estaban cubiertas por bosques y solo el 1.4% del territorio estaba asignado a asentamientos humanos o agricultura (Kunz et al., 2022). Consideramos que la detección geográfica de frugívoros de gran tamaño en todo el territorio es un indicio más de su alto estado de conservación. Dos órdenes de aves se encuentran entre los más amenazados, los Psitaciformes con un 28-29 % de las especies de loros consideradas amenazadas (Berkunsky et al., 2017) y los Galliformes, en particular los Cracidae, que tienen un nivel de amenaza del 38 % (Whitworth et al., 2018).

Escuchamos bagara pawarra (guacamayo ambiguo) en cada una de las siete grabadoras y la bagara purru (guacamayo rojo y verde) en seis de los siete sitios. A su vez, en frecuencia de registro, bagara pawarra (guacamayo ambiguo) ocupa el segundo lugar después de care (loro amazónico), lo que confirma la observación del fallecido George Angehr, quien señaló, en 2019, que las TCEB era el lugar donde observó el mayor número de bagara pawarra (guacamayo ambiguo) en su vida. A pesar de ser aves de caza importantes, los Cracidae también están representados en nuestras grabaciones con el socorro (*T. major*) escuchado en las siete grabadoras, el tusii (*P. purpurascens*) en seis de ellos y el samoo (*C. rubra*) en dos. La distancia lineal entre los registradores es de aproximadamente 30 km. Si bien esto está dentro de la distancia de vuelo de las guacamayas, las grabadoras están demasiado separadas para que se escuchen las mismas aves terrestres en todas ellas.

El conjunto de aves descritas aquí a través de grabaciones acústicas proporciona información valiosa sobre aspectos importantes de la avifauna del sureste del Darién. Registramos cuatro de las seis especies de aves clasificadas como amenazadas en la lista de aves del Parque Nacional Darién (Clements, 2023). Nuestra lista de aves incluye varias especies endémicas

de Panamá o de la región de Choco-Darién. Para otras especies, Darién aparentemente representa el límite occidental de distribuciones con una distribución mayoritariamente sudamericana. En su análisis de la avifauna de Panamá, Miller (2014) señaló la alta diversidad de aves en el país e invocó el gradiente de precipitación como explicación. Nuestros análisis sugieren que la diversidad de árboles, la altura y la presencia de *D. oleifera* fueron un fuerte determinante de las comunidades de aves. La literatura sugiere que muchas aves de gran tamaño anidan en cavidades (Lewis et al., 2024) y que la ausencia de árboles de gran tamaño en los bosques secundarios podría ser la razón por la cual las aves de gran tamaño tienden a estar ausentes de estos bosques (Dantas Oliveira et al., 2024). En el caso del TCEB, la calidad del bosque es sin lugar a duda un elemento clave para explicar la presencia de los grandes frugívoros.

Los habitantes de las TCEB dependen de la caza, la pesca y la recolección para alimentarse. A pesar de la presión de la caza, aves que son objetivos preciados como el samoo (*C. rubra*), tusii (*P. purpurascens*) y socorro (*T. major*) se escucharon en todo el paisaje. Estudiando la práctica de caza del pueblo Bugle del oeste de Panamá (Smith, 2010) concluyó que no se estaba produciendo caza excesiva en ese territorio ya que se encontraron aves de caza dentro de la zona de caza de 1 km de la casa de los participantes. Según se informa, los Emberá de las TCEB caminan entre 1 y 2 horas hacia el bosque para recolectar material vegetal o cazar (Alejo-Monroy et al en prensa). Al estar nuestras grabadoras ubicadas dentro de ese rango y siguiendo la lógica de Smith (Smith 2010), el hecho de que las grabadoras capturaran los cantos de las aves de caza dentro de la zona de caza probablemente sugiere que la caza de los Emberá es sostenible. El otro grupo de especies amenazadas a nivel mundial que registramos son los bagaras (guacamayos).

Los bagaras (guacamayos) necesitan árboles viejos y grandes para sus nidos, por lo que pueden considerarse especies paraguas (Olah et al., 2014). Las amenazas, son la pérdida de hábitat debido a la agricultura y el comercio como mascotas (Berkunsky et al., 2017). Las bagaras (guacamayos), care (loro amazónico) y otros loros se encuentran en las aldeas Emberá como mascotas y nos han dicho que hay un mercado para bagaras fuera de las TCEB. Nuestras grabadoras generalmente se instalaron a dos horas de caminata de las aldeas, nuestros resultados sugieren que, a pesar de la caza y la captura, la población de los grandes frugívoros amenazados está sana.

Una motivación clave de los Emberá al unir fuerzas con nuestro equipo de biólogos es documentar y mostrar su éxito en la conservación del bosque. Mientras el mundo enfrenta una sexta crisis de extinción masiva (Turvey & Crees, 2019), el pueblo Emberá del río Balsa convive con el bosque de una manera que protege elementos clave de su biodiversidad, como las aves. Un estudio realizado en Brasil señaló una brecha importante en la investigación ecológica tropical, a saber, que muchas áreas de estudio se encuentran en lugares accesibles y casi ninguna investigación se lleva a cabo en territorios indígenas (Carvalho et al., 2023). Lo mismo se podría decir de Panamá y *Bacurú Drõa* proporciona un modelo de investigación participativa que podría servir para llenar ese vacío.

CONCLUSIONES

La lejanía y la compleja logística de acceso a la región de muestreo en Darién, dificulta que el equipo de investigación realice inventarios completos de aves por largos periodos de tiempo, por lo que la grabación acústica como técnica de muestreo ha sido probada de forma exitosa para la comprensión de la diversidad no sólo de las aves del sotobosque sino también de las del dosel. El conjunto de aves descritas aquí a través de grabaciones acústicas proporciona información valiosa sobre aspectos importantes de la avifauna del sureste del Darién. La diversidad de frugívoros e insectívoros se asocia positivamente con una mayor altura de los árboles, mientras que los omnívoros y nectarívoros aparentemente responden a la diversidad de los árboles. El pueblo Emberá del río Balsa convive con el bosque de una manera que protege elementos clave de su biodiversidad, como las aves. Los Emberá han incorporado la ecología y el comportamiento de las aves en su forma de vida

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo no hubiese sido posible sin el apoyo del Congreso región de las TCEB y sus autoridades tradicionales. A las siguientes personas por no tener número ORCID la mesa editora de la revista *Tecnociencia* no permite ponerlos como co-autores: Euclides Campos, Uvencio Guaynora, Adriana Mezua, Andrés Casama, Delfino Olea, Irving Salazar, Alexis Ortega, Juanico Ortega.

En Panamá la Lic. Lady Mancilla nos brindó un logístico apoyo continuo. El Lic. Darién Montañez fue de mucho apoyo en discusiones sobre las características de la avifauna del Balsa. El apoyo del Instituto Smithsonian de investigaciones tropicales, en particular de la Oficina de Seguridad fue invaluable. También estamos agradecido a la SENAFRONT cuyo apoyo nos permitió de trabajar con calma en zonas alejadas del Darién. Esta investigación ha sido financiada por el proyecto de SENACYT “*El valor de conservación de los bosques antiguos de Darién*” (PFID-FID-2021-93) liderizado por HB y la Canadá Research Chair “*Climate Change Mitigation and Tropical Forests*” de CP y el proyecto “*Estudio de viabilidad - integración de métodos (bio)acústicos para la cuantificación de la diversidad biológica en la vigilancia forestal*” AkWamo (2221NR050C) de SM que cuenta con fondos Alemanes del Ministerio Federal de Alimentación y Agricultura (BMEL) a través de la Agencia de Recursos Renovables (FNR). Las grabadoras fueron financiadas por la Sociedad Científica de Friburgo de Brisgovia, Alemania. SM desea agradecer a Dr. Michael Scherer-Lorenzen su ayuda para obtener financiación para las grabadoras de audio. Estamos agradecidos a la gente y las autoridades tradicionales de Balsa de haberse tomado el tiempo de validar la información sobre el conocimiento tradicional.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Angehr GR, Dean. R. (2010). *The Birds of Panama : A Field Guide*. . Comstock Pub. Associates.
- Berkunsky, I., Quillfeldt, P., Brightsmith, D. J., Abbud, M. C., Aguilar, J., Alemán-Zelaya, U., Aramburú, R. M., Ariash, A. A., McNab, R. B., Balsby, T. J. S., Barberena, J. M. B., Beissinger, S. R., Rosales, M., Berg, K. S., Bianchi, C. A., Blanco, E., Bodrati, A., Bonilla-Ruz, C., Botero-Delgado, E., . . . Masello, J. F. (2017). Current threats faced by Neotropical parrot populations. *Biological Conservation*, 214, 278-287. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2017.08.016>
- Bregman, T. P., Sekercioglu, C. H., & Tobias, J. A. (2014). Global patterns and predictors of bird species responses to forest fragmentation: Implications for ecosystem function and conservation. *Biological Conservation*, 169, 372-383. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.biocon.2013.11.024>
- Carvalho, R. L., Resende, A. F., Barlow, J., França, F. M., Moura, M. R., Maciel, R., Alves-Martins, F., Shutt, J., Nunes, C. A., Elias, F., Silveira, J. M., Stegmann, L., Baccaro, F. B., Juen, L., Schiatti, J., Aragao, L., Berenguer, E., Castello, L., Costa, F. R. C., . . . Vieira, I. C. G. (2023). Pervasive gaps in Amazonian ecological research. *Current Biology*, 33(16), 3495-+. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2023.06.077>
- Chassot O, M. A. G. (2012). Connectivity conservation of the Great green Macaw's landscape in Costa Rica and Nicaragua (1994-2012(*Parks*, 18.1, 61-69.
- Clements. (2023). Avibase checklist Darien National Park. <https://avibase.bsc-eoc.org/checklist.jsp?lang=EN&p2=1&list=clements&synlang=®ion=PA&r01&version=text&lifelists=&highlight=0>
- Cornell Lab (2025). *eBird*. Laboratorio de Ornitología de la Universidad de Cornell , New York, (<https://ebird.org/home>)
- Dantas Oliveira, C., Cornelius, C., Stouffer, P. C., & Cockle, K. L. (2024). Secondary Amazon rainforest partially recovers tree cavities suitable for nesting birds in 18–34 years. *Ornithological Applications*, 126(3). <https://doi.org/10.1093/ornithapp/duae008>

- Darién, C. (2021). Trafficking as settler colonialism in eastern Panama: Linking the Americas via illicit commerce, clientelism, and land cover change. *World Development*, 145 (105490.). <https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2021.105490>.
- Darras, K., Batáry, P., Furnas, B. J., Grass, I., Mulyani, Y. A., & Tschardtke, T. (2019). Autonomous sound recording outperforms human observation for sampling birds: a systematic map and user guide. *Ecological Applications*, 29(6), e01954. <https://doi.org/10.1002/eap.1954>
- de Camargo, U., Roslin, T., & Ovaskainen, O. (2019). Spatio-temporal scaling of biodiversity in acoustic tropical bird communities. *Ecography*, 42(11), 1936-1947. <https://doi.org/10.1111/ecog.04544>
- Garnett, S. T., Burgess, N. D., Fa, J. E., Fernandez-Llamazares, A., Molnar, Z., Robinson, C. J., Watson, J. E. M., Zander, K. K., Austin, B., Brondizio, E. S., Collier, N. F., Duncan, T., Ellis, E., Geyle, H., Jackson, M. V., Jonas, H., Malmer, P., McGowan, B., Sivongxay, A., & Leiper, I. (2018). A spatial overview of the global importance of Indigenous lands for conservation. *Nature Sustainability*, 1(7), 369-374. <https://doi.org/10.1038/s41893-018-0100-6>
- Kane, S. C. (2015). Bird Names and Folklore from the Embera (Choco) in Darien, Panama. *Ethnobiology Letters*, 6(1), 32-62. <https://doi.org/10.14237/eb1.6.1.2015.226>
- Kunz, M., Barrios, H., Dan, M. C. L., Dogirama, I., Gennaretti, F., Guillemette, M., Koller, A., Madsen, C., Lana, G., Ortega, A., Ortega, M., Paripari, J., Piperno, D., Reich, K. F., Simon, T., Solis, F., Solis, P., Valdes, J., von Oheimb, G., & Potvin, C. (2022). <i>Bacuru Droa</i>: Indigenous forest custody as an effective climate change mitigation option. A case study from Darien, Panama. *Frontiers in Climate*, 4, Article 1047832. <https://doi.org/10.3389/fclim.2022.1047832>
- Lewis, T. C., Vargas, I. G., Vredendregt, C., Jimenez, M., Hatchwell, B., Beckerman, A. P., & Childs, D. Z. (2024). Nest-site selection and reproductive success of a critically endangered parrot, the Great Green Macaw (<i>Ara ambiguus</i>), in an anthropogenic landscape. *Ibis*, 166(2), 518-533. <https://doi.org/10.1111/ibi.13262>
- Miller, M. J. (2014). A distinctive avian assemblage (Aves: Passeriformes) in Western Darien, Panama is uncovered through a disease surveillance program. *Revista De Biologia Tropical*, 62(2), 711-717. <https://doi.org/10.15517/rbt.v62i2.10493>
- Myers, N., Mittermeier, R. A., Mittermeier, C. G., da Fonseca, G. A. B., & Kent, J. (2000). Biodiversity hotspots for conservation priorities. *Nature*, 403(6772), 853-858. <https://doi.org/10.1038/35002501>

- Oksanen, J., Guillaume Blanchet, F., Friendly, M., Kindt, R., Legendre, P., McGlinn, D., et al. (2019). *vegan: Community Ecology Package*. <https://cran.r-project.org/package=vegan>
- Olah, G., Vigo, G., Heinsohn, R., & Brightsmith, D. J. (2014). Nest site selection and efficacy of artificial nests for breeding success of Scarlet Macaws *Ara macao macao* in lowland Peru. *Journal for Nature Conservation*, 22(2), 176-185. <https://doi.org/10.1016/j.jnc.2013.11.003>
- R.S. Ridgely, J. A. G. (1992). *Birds of Panama*. Princeton Nature.
- Robinson, W. D. (1999). Long-term changes in the avifauna of Barro Colorado Island, Panama, a tropical forest isolate. *Conservation Biology*, 13(1), 85-97. <https://doi.org/10.1046/j.1523-1739.1999.97492.x>
- S. D. Davis, V. H. (1997). *Centres of plant diversity : a guide and strategy for their conservation*, v.3. Americas <https://portals.iucn.org/library/node/6865>
- Santos-Moreno, A., Pérez-Irineo, G., & Ventura-Cristóbal, E. (2019). Diversity of understory birds in a perennial tropical forest at Los Chimalapas, Mexico. *Wilson Journal of Ornithology*, 131(3), 606-614. <https://doi.org/10.1676/18-182>
- Sedláček, O., Pernice, R., Ferenc, M., Mudrová, K., Motombi, F. N., Albrecht, T., & Hořák, D. (2023). Abundance variations within feeding guilds reveal ecological mechanisms behind avian species richness pattern along the elevational gradient of Mount Cameroon. *Biotropica*, 55(3), 706-718. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/btp.13221>
- Smith, D. A. (2010). THE HARVEST OF RAIN-FOREST BIRDS BY INDIGENOUS COMMUNITIES IN PANAMA*. *Geographical Review*, 100(2), 187-203. <https://doi.org/10.1111/j.1931-0846.2010.00021.x>
- Thomsen, B., Copeland, K., Harte, M., Muurlink, O., Villar, D. A., Mirin, B. H., Fennell, S. R., Deshwal, A., Campbell, P., Pekrul, A., Murtough, K. L., Kulkarni, A., Kumar, N., Thomsen, J., Coose, S., Maxwell, J., Zhang, Z., Nickerson, D., & Gosler, A. (2023). Decolonizing bird knowledge: More-than-Western bird-human relations. *Ornithological Applications*, 126(1). <https://doi.org/10.1093/ornithapp/duad053>
- Turvey, S. T., & Crees, J. J. (2019). Extinction in the Anthropocene. *Current Biology*, 29(19), R982-R986. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2019.07.040>
- van Uhm, D. P., & Grigore, A. G. (2021). Indigenous People, Organized Crime and Natural Resources: Borders, Incentives and Relations. *Critical Criminology*, 29(3), 487-503. <https://doi.org/10.1007/s10612-021-09585-x>

- Whitworth, A., Beirne, C., Flatt, E., Huarcaya, R. P., Diaz, J. C. C., Forsyth, A., Molnár, P. K., & Soto, J. S. V. (2018). Secondary forest is utilized by Great Curassows (<i>Crax rubra</i>) and Great Tinamous (<i>Tinamus major</i>) in the absence of hunting. *Condor*, 120(4), 852-862. <https://doi.org/10.1650/condor-18-57.1>
- Wilman, H., Belmaker, J., Simpson, J., de la Rosa, C., Rivadeneira, M. M., & Jetz, W. (2014). EltonTraits 1.0: Species-level foraging attributes of the world's birds and mammals. *Ecology*, 95(7), 2027-2027. <https://doi.org/https://doi.org/10.1890/13-1917.1>



Diversidad de especies de hifomicetos acuáticos en espuma y hojarasca sumergida en áreas rurales y urbanizadas del río Caimito, Boquerón, Chiriquí, Panamá

Diversity of aquatic hyphomycetes in foam and submerged leaf litter in rural and urbanized areas of the Caimito River, Boqueron, Chiriquí, Panama

Victor J. Reyes

Universidad Autónoma de Chiriquí, Facultad de Ciencias Naturales y Exactas, Panamá.

Victor.reyes1@unachi.ac.pa

<https://orcid.org/0009-0004-2975-2174>

Tina A. Hofmann

Universidad Autónoma de Chiriquí, Facultad de Ciencias Naturales y Exactas, Panamá.

Tina.hofmann@unachi.ac.pa

<https://orcid.org/0000-0003-1124-402X>

Hilda L. Lezcano

Universidad Autónoma de Chiriquí, Facultad de Ciencias Naturales y Exactas, Panamá.

Hilda.lezcano@unachi.ac.pa

<https://orcid.org/0000-0002-2267-3092>

Orlando A. Cáceres

Universidad Autónoma de Chiriquí, Facultad de Ciencias Naturales y Exactas, Escuela de Biología, Panamá.

Orlando.caceres@unachi.ac.pa

<https://orcid.org/0000-0002-4130-3011>

Fecha de recepción: 9 de abril de 2025

Fecha de aceptación: 20 de mayo 2025

DOI: <https://doi.org/10.48204/j.tecno.v27n2.a7673>

RESUMEN

Los hifomicetos acuáticos son un grupo de hongos asexuales especializados en la descomposición de la materia orgánica y ciclado de nutrientes en los ecosistemas acuáticos. El estudio de la diversidad de los hifomicetos acuáticos es de gran importancia ecológica, ya que estos hongos son indicadores de la calidad de los ecosistemas acuáticos. Se analizó la diversidad de hifomicetos acuáticos a partir de muestras de espuma y hojarasca

sumergida con evidencia de descomposición, colectadas de las cuencas alta, media y baja del río Caimito, se utilizó el índice de Shannon-Wiener para evaluar la diversidad. En total se identificaron 51 morfoespecies, de

las cuales 43 fueron clasificadas a nivel de especie, distribuyéndose en 35 géneros. La distribución a lo largo de la trayectoria de la cuenca fue de 27 morfoespecies en la cuenca alta, 26 en la cuenca media y 25 en la cuenca baja. El índice de diversidad total fue de 2.65, lo que indica una diversidad media y sugiere una relativa estabilidad en el ecosistema acuático, aunque posiblemente afectada por actividades antropogénicas.

PALABRAS CLAVE

Conidio, diversidad, espuma, hifomicetos acuáticos, Panamá.

ABSTRACT

Aquatic hyphomycetes are a group of asexual fungi specialized in the decomposition of organic matter and nutrient cycling in aquatic ecosystems. The study of the diversity of aquatic hyphomycetes is of great ecological importance, since these fungi are indicators of the quality of aquatic ecosystems. In this research, the diversity of aquatic hyphomycetes was analyzed from samples of foam and submerged leaf litter with evidence of decomposition, collected from the upper, middle and lower course of Caimito river, using the Shannon-Wiener index to evaluate diversity. A total of 51 morphospecies were identified, of which 43 were classified at the species level, distributed in 35 genera. The distribution within the Caimito river course was 27 morphospecies in the upper course, 26 in the middle course and 25 in the lower course. The total diversity index was 2.65, which indicates a medium diversity and suggests a relative stability in the aquatic ecosystem, although possibly affected by anthropogenic activities.

KEY WORDS

Conidium, diversity, foam, aquatic hyphomycetes, Panama.

INTRODUCCIÓN

Los hifomicetos acuáticos, también conocidos como hongos Ingoldianos, son hongos que se consideran imperfectos debido a que se desconoce una fase sexual en su ciclo de vida (Bärlocher, 1992). Estos hongos pertenecen a un grupo “*filogenéticamente artificial y heterogéneo*” (Pinto *et al.*, 2009) del reino Fungi, lo que quiere decir que están agrupados en función de similitudes como su modo de vida, comportamiento o morfología, en lugar de relaciones filogenéticas (Cepero de García *et al.*, 2012). Los mismos presentan una forma anamorfa y están especialmente adaptados a los medios acuáticos para producir esporas asexuales (conidios) grandes y ramificados, frecuentemente con formas estrelladas o radiadas. También las hay con formas sigmoideas, esféricas y enrolladas (Shearer *et al.*, 2007; Pinto *et al.*, 2009). Estos suelen encontrarse en material vegetal, principalmente en hojas que muestran evidencias de descomposición (Jabiol *et al.*, 2024).

Este grupo de hongos ha demostrado una notable adaptabilidad en diferentes ecosistemas acuáticos, que incluye tanto aguas dulces como salobres (aguas marinas), así como

microhábitats no convencionales, como tejados y cavidades de árboles que acumulan agua de lluvia (Gönczöl & Révay, 2003; Sridhar, 2005). En estos entornos, desempeñan un papel crucial en la descomposición de la materia orgánica, contribuyendo al mantenimiento del ciclo energético de los ecosistemas acuáticos (Urriola, 2017).

Diversos factores pueden influir en la comunidad de hifomicetos acuáticos, afectando su distribución y diversidad. Entre ellos, la estacionalidad influye en las regiones templadas (Iqbal, 1997), sin embargo, en regiones tropicales, la alternancia entre la estación lluviosa y seca juega un papel crucial en la distribución de estos hongos, debido a las variaciones en la temperatura y otros factores climáticos (Fernández & Smits, 2020). Además, el tipo de sustrato, la composición química de las hojas (Ferreira *et al.*, 2016; Fernández *et al.*, 2017) y a su vez, los factores fisicoquímicos del agua también influyen en la distribución de las especies de hifomicetos acuáticos (Fernández *et al.*, 2017), tales como la temperatura, el pH, afectando la diversidad de especies (Wood & Bärlocher, 1983), los nutrientes disponibles, siendo el nitrógeno y el fósforo los más influyentes en el desarrollo y esporulación de los hifomicetos (Iqbal, 1997), radiación ultravioleta, la composición química del agua (Bärlocher & Marvanová, 2010) y el oxígeno disuelto (Fernández *et al.*, 2010).

Aunque la mayoría de los estudios relacionados con los hifomicetos acuáticos se han llevado a cabo en regiones de climas templados, son escasos en los trópicos (Santos-Flores & Betancourt-López, 1997). Señala Bärlocher *et al.* (2010) que el interés por este grupo de hongos en los trópicos dio inicio en la década de los 70. En Panamá los primeros aportes sobre hifomicetos acuáticos incluyen el trabajo realizado por Santos-Flores y Betancourt-López (1997), quienes investigaron estos hongos en el río Majagua y Bärlocher *et al.* (2010), que analizaron 15 afluentes en la cuenca del Canal de Panamá. Además, Cáceres *et al.* (2015) documentaron cinco reportes de especies nuevas de hifomicetos adicionales en el río Majagua. Debido a los escasos estudios sobre este grupo de hongos y a la gran cantidad de afluentes en la provincia de Chiriquí, el presente estudio tiene como objetivo aportar conocimiento sobre la diversidad de especies de hifomicetos acuáticos en el río Caimito, Boquerón, Chiriquí-Panamá.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de Estudio

El estudio se realizó en el río Caimito, ubicado en el corregimiento de Boquerón Cabecera, Distrito de Boquerón, Provincia de Chiriquí, en el occidente de la República de Panamá. Se seleccionaron tres puntos de recolección de muestras en la trayectoria del río Caimito: la cuenca alta correspondiente a un área rural (8°31'28"N y 82°34'33"W), cuenca media

correspondiente a un área rural ($8^{\circ}30'57''\text{N}$ y $82^{\circ}34'23''\text{W}$) y la cuenca baja correspondiente a un área urbanizada ($8^{\circ}30'30''\text{N}$ y $82^{\circ}34'12''\text{W}$) (ver Figura 1).

Recolección y transporte de muestras

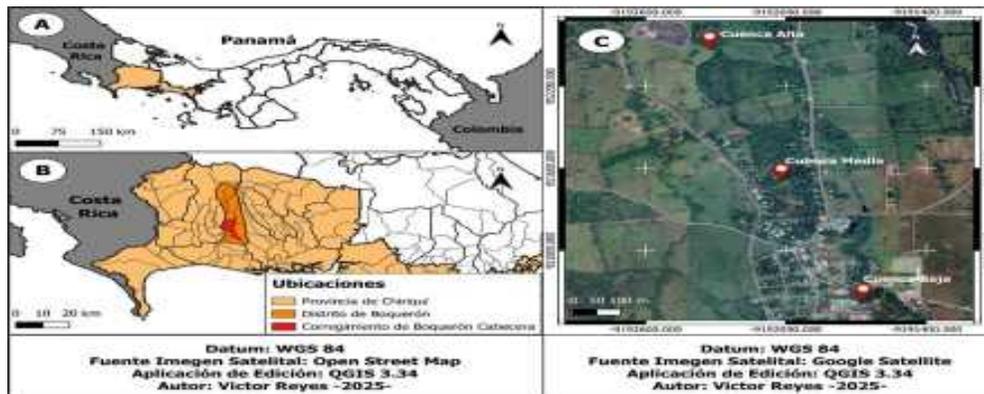
En las tres áreas de muestreo seleccionados se realizaron 18 muestreos a razón de seis muestras respectivamente, totalizando 108 muestras durante los meses de marzo hasta agosto del año 2024. Con un cucharón estéril se recolectaron tres muestras de espuma de 40 mL aproximadamente y se colocaron en envases recolectores estériles para análisis (100 mL). Con una pinza estéril se tomaron tres muestras de hojarasca sumergidas con evidencia de un estado en descomposición y fueron colocadas en bolsas de cierre deslizante (20 x 14.9 cm), se le añadió metronidazol al 10% como control biológico. Estas muestras se guardaron a una temperatura de 5°C aproximadamente para el transporte al laboratorio de investigación L-15 en la Facultad de Ciencias Naturales y Exactas de la Universidad Autónoma de Chiriquí.

Preparación de las muestras

Posterior a la recolección de las muestras se realizó un raspado con bisturí por el haz y el envés de las hojarasca sumergida para la extracción de los conidios, estas muestras al igual que las de espuma se colocaron en tubos tipo Falcon y se centrifugaron a 6000 revoluciones por minuto (rpm) durante 5 minutos. El sobrenadante se descartó quedando solo con el precipitado. Las placas fueron preparadas utilizando hidróxido de potasio (KOH) al 10% para separar el sedimento de los hifomicetos acuáticos, seguido se agregó la muestra y, por último, se le añadió lactofenol para la tinción de los conidios. Las placas se observaron con un microscopio de contraste de fase de marca Euromex® con lentes de objetivos de 40x y 100x.

Figura 1.

Localización del área de estudio. A. Mapa de la República de Panamá. B. Localización del Distrito y Corregimiento de Boquerón Cabecera. C. Mapa satelital de las localizaciones de las áreas de muestreo.



Identificación y registro de las muestras

La identificación de los hifomicetos acuáticos se basó en la morfología de los conidios y las claves taxonómicas de Ingold (1975), Descals *et al.* (1977), Roldán *et al.* (1987), Roldán *et al.* (1988), Santos-Flores & Betancourt-López (1997), Chan *et al.* (2000), Gulis *et al.* (2005), Cáceres *et al.* (2015), Urriola (2017), y Rivera (2021). Para la validación de la nomenclatura se utilizó el banco de datos Index Fungorum (<https://indexfungorum.org>). Las especies identificadas fueron registradas de manera fotográfica y a su vez se pasaron a escala con el programa Fiji v. 2.14.0 (Rasband *et al.*, 2023).

Determinación de diversidad de hifomicetos acuáticos

Se utilizó índice de Shannon-Wiener para determinar la diversidad de hifomicetos acuáticos donde: H' = índice de diversidad de especies es el contenido de información de la muestra (bits/individuos), S = número de especies, p_i = proporción de la muestra total que pertenece a la especie i respecto al total de individuos.

$$\text{Formula: } H' = \sum_{i=1}^S (p_i)(\log_2 p_i)$$

Los valores utilizados para determinar el índice de diversidad fueron los de Villarreal *et al.* (2004) donde la diversidad baja = H' entre 0 y < 1.5 , diversidad media = $H' \geq 1.5$ y ≤ 2.7 y diversidad alta = $H' > 2.7$.

También se evaluó la uniformidad implementando el índice de Pielou.

$$\text{Formula: } E = H' / H_{max} = H' / \ln S$$

Se emplearon los valores de Magurran (1988) los cuales van de 0 a 1, donde 1 corresponde a que todas las especies son igualmente abundantes. Todos los cálculos se realizaron con el paquete PAST v. 4.05 (Hammer, 2020).

Análisis estadístico

En el análisis estadístico aplicamos la prueba Chi-cuadrado (X^2) de Bondad de Ajuste, con el propósito de determinar diferencias significativas en la diversidad de hifomicetos acuáticos en el río Caimito, en función al área de estudio (rural o urbanizada), en función al sustrato (hojarasca o espuma) y en función de la zona de la cuenca (alta, media o baja). El análisis estadístico se realizó en el paquete estadístico SPSS v. 23 (IBM, 2021), con un nivel de significancia de $\alpha=0.05$ y un 95% de confianza.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En total observamos 51 morfoespecies de hifomicetos acuáticos en el río Caimito, de las cuales 43 fueron identificadas a nivel de especie, seis a nivel de género y dos no se lograron identificar con la literatura consultada. En la Tabla 1 se comparan las especies identificadas en este estudio con aquellas reportadas previamente por Santos-Flores & Betancourt-López (1997) en el río Majagua, Bärlocher *et al.* (2010) en 15 afluentes de la cuenca del Canal de Panamá, Cáceres *et al.* (2015) en el río Majagua, Urriola (2017) en el río Macho de Monte y Rivera (2021) en el río Palo Alto.

Tabla 1.

Especies de hifomicetos acuáticos identificados en el río Caimito, comparado con aquellas encontradas por otros autores. *Reportes nuevos están resaltados en negrita. Codificación de referencias: 1 Santos-Flores & Betancourt-López (1997), 2 Bärlocher et al. (2010), 3 Cáceres et al. (2015), 4 Urriola (2017), 5 Rivera (2021).*

Nº	Especies	En este estudio	1	2	3	4	5
1	<i>Alatospora acuminata</i> Ingold	x		x			x
2	<i>Alatospora sp.</i> Ingold	x					
3	<i>Anguillospora crassa</i> Ingold	x		x		x	x
4	<i>Aquanectria submersa</i> (H.J. Huds.) L. Lombard & Crous	x	x	x	x	x	x
5	<i>Arbusculina irregularis</i> (R.H. Petersen) Marvanová & Descals	x					
6	<i>Beltrania rhombica</i> Penz.	x				x	
7	<i>Beltraniopsis ramosa</i> R.F. Castañeda	x					
8	<i>Brachiosphaera tropicalis</i> Nawawi	x	x				x
9	<i>Camposporium marylandicum</i> Shearer	x					x
10	<i>Campylospora sp.</i> Nawawi	x				x	x
11	<i>Chaetospermum chaetosporum</i> (Pat.) A.L. Sm. & Ramsb.	x				x	
12	<i>Clavariana aquatica</i> Nawawi *	x					
13	<i>Clavariopsis azlanii</i> Nawawi	x			x		x
14	<i>Clavatospora tentacula</i> Sv. Nilsson	x		x	x	x	x
15	<i>Condylospora spumigena</i> Nawawi	x					
16	<i>Diplocladiella taurina</i> Cazau, Aramb. & Cabello	x					
17	<i>Flabellospora acuminata</i> Descals	x		x		x	x
18	<i>Flabellospora crassa</i> Alas.	x			x	x	x

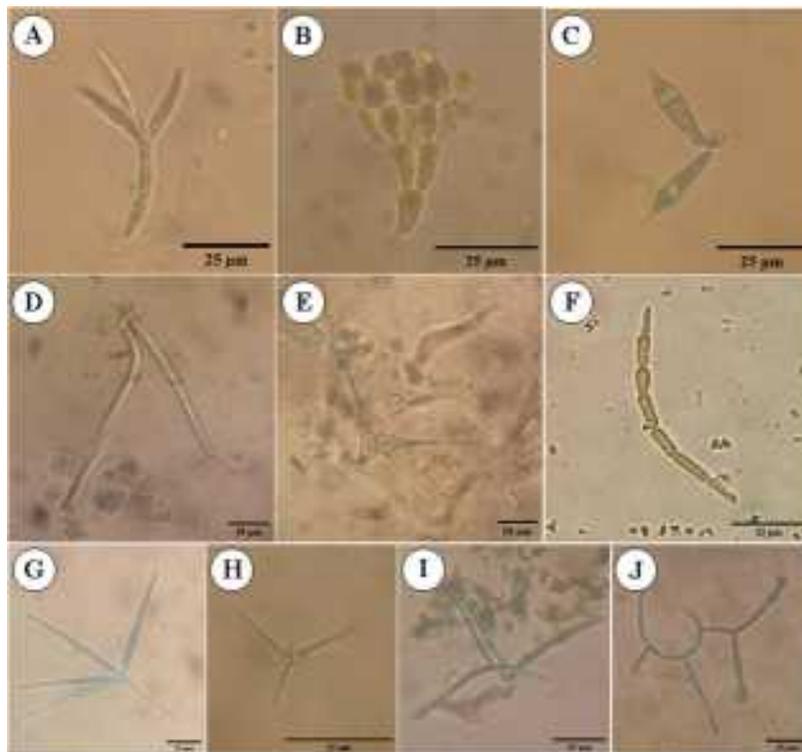
Nº	Especies	En este estudio	1	2	3	4	5
19	<i>Flabellospora multiradiata</i> Nawawi	x				x	
20	<i>Flabellospora verticillata</i> Alas.	x				x	
21	<i>Flagellospora curvula</i> Ingold	x		x		x	x
22	<i>Helicomycetes colligatus</i> R.T. Moore	x				x	x
23	<i>Helicomycetes torquatus</i> L.C. Lane & Shearer	x	x			x	
24	<i>Hymenoscyphus tetracladius</i> Abdullah, Descals & J. Webster	x		x			x
25	<i>Helicomycetes</i> sp. Link	x				x	x
26	<i>Isthmolongispora quadricellularia</i> Matsush.	x					
27	<i>Isthmotricladia gombakiensis</i> Nawawi	x					
28	<i>Lateriramulosa uniinflata</i> Matsush.	x					
29	<i>Lunulospora curvula</i> Ingold	x		x	x	x	x
30	<i>Lunulospora cymbiformis</i> K. Miura	x		x			
31	<i>Mycocentrospora acerina</i> (R. Hartig) Deighton	x		x		x	x
32	<i>Phalangispora constricta</i> Nawawi & J. Webster	x		x		x	
33	<i>Phalangispora nawawii</i> Kuthub.	x				x	
34	<i>Scorpiosporium gracile</i> (Ingold) S.H. Iqbal	x				x	
35	<i>Scorpiosporium</i> sp. S.H. Iqbal	x			x		
36	<i>Scutisporus brunneus</i> K. Ando & Tubaki	x				x	x
37	<i>Speiropsis pedatospora</i> Tubaki	x				x	
38	<i>Tetracladium setigerum</i> (Grove) Ingold	x	x			x	x
39	<i>Tetraploa aristata</i> Berk. & Broome	x				x	x
40	<i>Tricladium castaneicola</i> B. Sutton	x					
41	<i>Tricladium splendens</i> Ingold	x	x				
42	<i>Trinacrium</i> sp. Riess	x				x	x
43	<i>Tripaspermum porosporiferum</i> Matsush. 1993	x				x	x
44	<i>Triscelophorus acuminatus</i> Nawawi	x		x		x	x
45	<i>Triscelophorus curviramifer</i> Matsush.	x				x	x
46	<i>Triscelophorus monosporus</i> Ingold	x		x	x	x	x
47	<i>Triscelophorus ponapensis</i> Matsush.	x				x	x
48	<i>Trisulcosporium acerinum</i> H.J. Huds. & B. Sutton	x				x	
49	<i>Varicosporium</i> sp. W. Kegel	x					
50	Especie desconocida 1	x					
51	Especie desconocida 2	x					

Fuente: Reyes, 2024

En este estudio, se identificaron 5 de las 11 especies descritas por Santos-Flores & Betancourt-López (1997), 13 de las 32 reportadas por Bärlocher *et al.* (2010), 7 de las 13 especies registradas por Cáceres *et al.* (2015), 30 de las 63 especies descritas por Urriola (2017) y 25 de las 65 especies identificadas por Rivera (2021). Hay que señalar que Betancourt-López en 1988 fue el primero en reportar la presencia de la especie *Clavariana aquatica* en Panamá (Fernández & Smits, 2024). No obstante, es hasta en la presente investigación que se vuelve a observar dicha especie (ver Tabla 1). Además, se registraron 10 nuevos reportes de hifomicetos acuáticos para Panamá (ver Figura 2).

Figura 2.

Nuevos reportes de conidios de hifomicetos acuáticos observados en el río Caimito, 2024. A. *Alatospora* sp. B. *Arbusculina irregularis*. C. *Beltraniopsis ramosa*. D. *Condylospora spumigena*. E. *Diplocladiella taurina*. F. *Isthmolongispora quadricellularia*. G. *Isthmotricladia gombakiensis*. H. *Lateriramulosa uniinflata*. I. *Tricladium castaneicola*. J. *Varicosporium* sp.

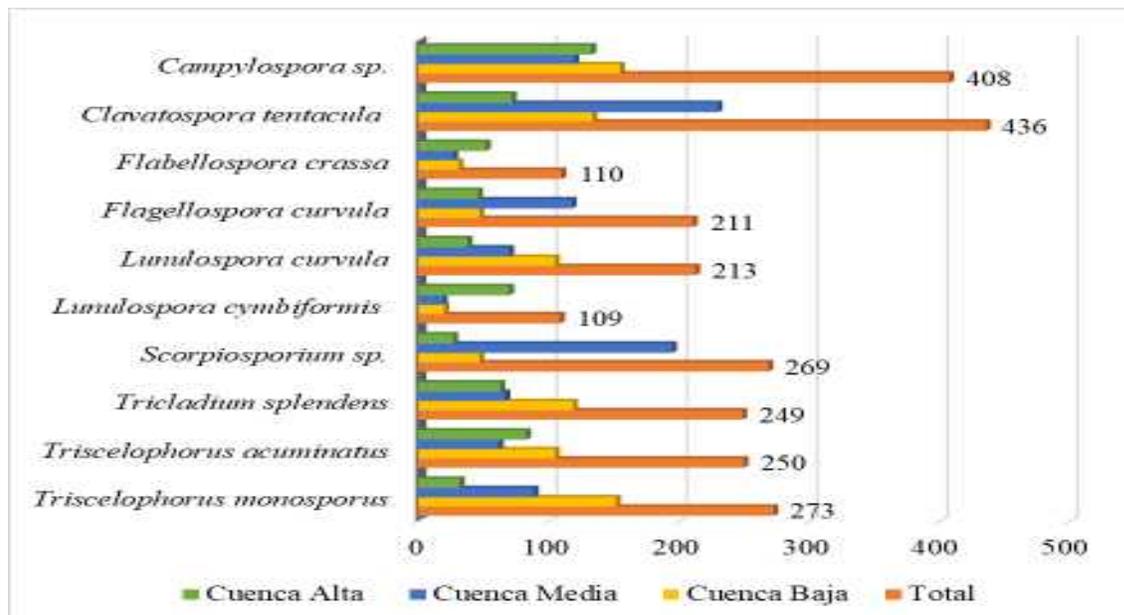


En la Figura 3 se presentan las 10 especies más frecuentes ($n > 100$ conidios), las cuales estuvieron presentes en las 3 zonas muestreadas de la cuenca. Los hallazgos sobre estas especies coinciden con estudios previos realizados en distintos países de América del Sur, donde se han identificado especies como *Lunulospora curvula* (Schoenlein-Crusius & Grandi, 2003), *Campylospora* sp., *Flagellospora curvula*, *Clavatospora tentacula*, *Scorpiosporium* sp., y *Triscelophorus monosporus* (Pinto *et al.*, 2009), *Triscelophorus acuminatus* (Bärlocher *et al.*, 2010) y *Flabellospora crassa* (Storaci *et al.*, 2013). Cabe destacar que Schoenlein-Crusius & Grandi (2003) mencionan que *Lunulospora curvula*, al igual que *Triscelophorus acuminatus*, son comunes en áreas tropicales y subtropicales. Por otro lado, a diferencia de los resultados obtenidos por Storaci *et al.* (2013), quienes

registraron esporádicamente la especie *L. cymbiformis*, en este estudio se observó una abundancia significativa de dicha especie, con un total de 109 identificaciones. En contraste, algunas especies se registraron con menor frecuencia ($n = 1$ conidio), entre ellas *Alatospora* sp., *Anguillospora crassa*, *Arbusculina irregularis*, *Condylospora spumigena*, *Diplocladiella taurina*, *Flabellospora multiradiata*, *Helicomycetes* sp., *Lateriramulosa uniinflata*, *Mycocentrospora acerina*, *Scutisporus brunneus*, *Trinacrium* sp., *Triscelophorus ponapensis* y la especie desconocida 2.

Figura 3.

Especies de hifomicetos acuáticos más frecuentes en las cuencas del río Caimito.

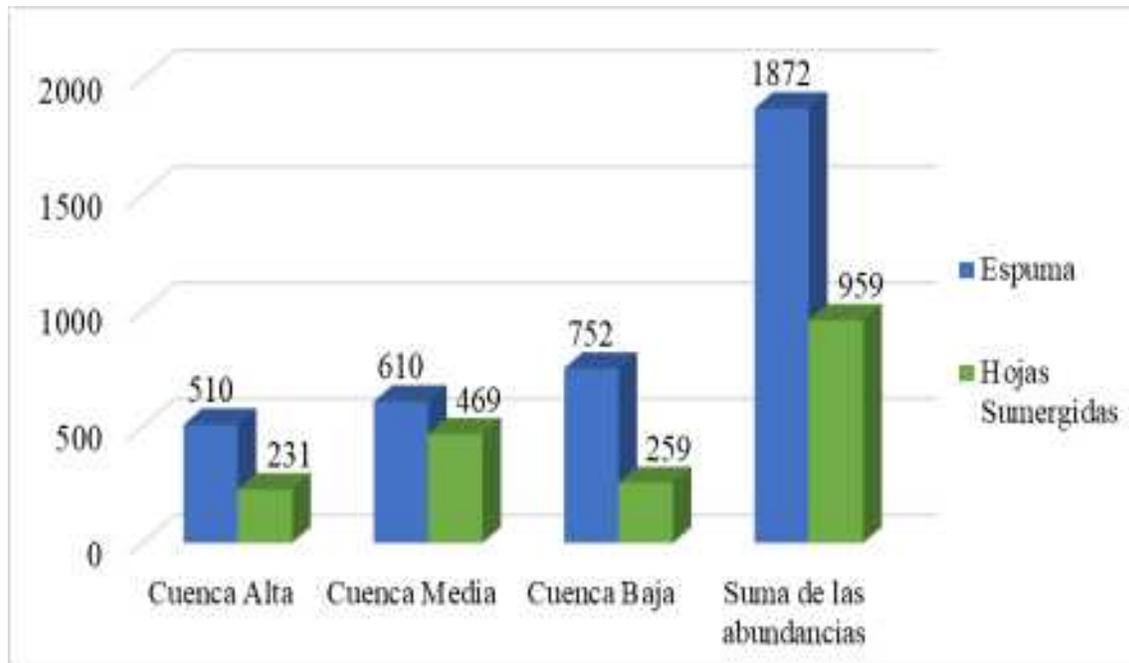


El análisis de la abundancia según el sustrato en cada zona de muestreo de la cuenca mostró una diferencia significativa en los hifomicetos acuáticos (ver Figura 4). En la cuenca alta, las muestras de espuma presentaron una frecuencia de 510 conidios, superior a las muestras

de hojas sumergidas ($X^2 = 105.05, g. l = 1, P < 0.0001$). En la cuenca media, la frecuencia en espuma fue de 610 conidios, también mayor a las de hojas sumergidas ($X^2 = 18.43, g. l = 1, P < 0.0001$). En la cuenca baja, la diferencia aumentó a 752 conidios, valor superior a las muestras de hojas sumergidas ($X^2 = 240.41, g. l = 1, P < 0.0003$). Sin embargo, al sumar las frecuencias de las tres zonas de muestreo de la cuenca, se obtuvo un total de 1872 conidios (equivalente al 66%) en muestras de espuma y 959 (34%) en hojas sumergidas ($X^2 = 294.44, g. l = 1, P < 0.0005$) (ver Figura 4). Estos resultados coinciden con los hallazgos de Burgos & Shearer (1983) y Pinto *et al.* (2009), quienes también reportaron una mayor abundancia de hifomicetos acuáticos en muestras de espuma de origen natural, destacando que las muestras de espuma ubicadas en los remansos de los ríos son un método eficaz para la observación de la diversidad y variedad de conidios.

Figura 4.

Comparación de la abundancia de hifomicetos acuáticos por sustrato en las cuencas del río Caimito.



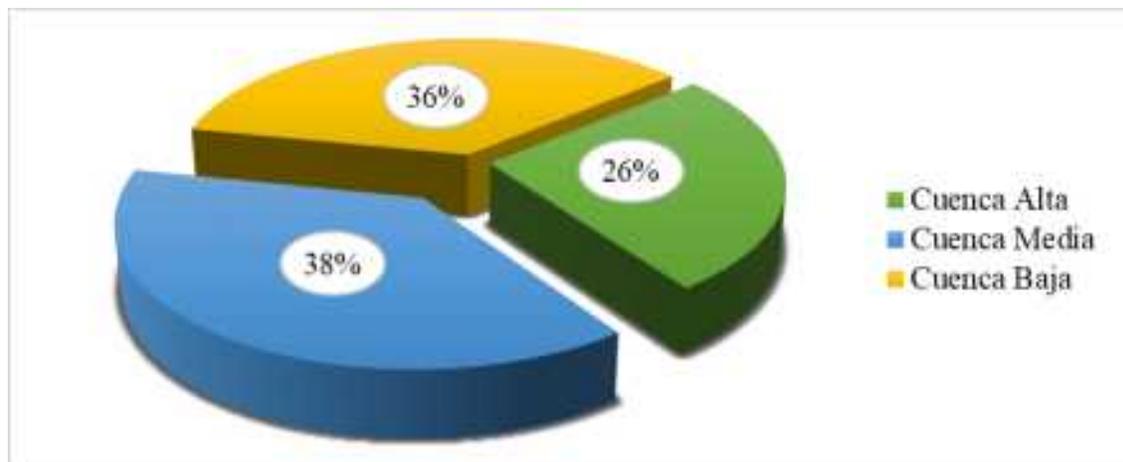
La elevada abundancia de estos hongos en las muestras de espuma podría estar relacionada con la morfología tetra radiada de los conidios. Dang *et al.* (2007) señalan que las características morfológicas de los conidios son determinantes para la adhesión a diversas superficies, ya que la cantidad de apéndices le proporciona flotabilidad y un mayor punto de anclaje a sustratos vegetales o minerales en ríos de corrientes turbulentas. Estas formas de esporas pueden ser el resultado de un proceso de selección natural que favorece su dispersión y colonización en ambientes acuáticos. Por otro lado, la diferencia de abundancia de los

hifomicetos acuáticos en hojas sumergidas podría estar influenciada por la vegetación ribereña del río Caimito, la cual estaba compuesta principalmente por plantas con hojas de cutícula cerosa, como *Anacardium* sp., *Mangifera* sp., *Posoqueria* sp., *Trophis* sp. entre otros. Según Dang *et al.* (2007), la ausencia de estructuras foliares, como los tricomas, puede afectar la etapa inicial de fijación de los conidios, dejando las hojas más expuestas a la sedimentación. Esta capa de minerales particulados no solo recubre la superficie foliar, sino que también puede favorecer el desprendimiento de los conidios debido a la turbulencia propia de los ríos.

Sin embargo, al analizar la abundancia total por zona de muestreo, sin distinguir entre sustratos, se observó una mayor cantidad de hifomicetos acuáticos en la cuenca media correspondiente a un área rural con un total de 1079 conidios (equivalente al 38%), en comparación de la cuenca baja correspondiente al área urbanizada con 1011 conidios (36%), y la cuenca alta correspondiente al área rural con 741 conidios (26%) ($X^2 = 67.74$, $g.l = 2$, $P < 0.0001$) (ver Figura 5).

Figura 5.

Porcentaje de hifomicetos acuáticos por cuenca en el río Caimito.



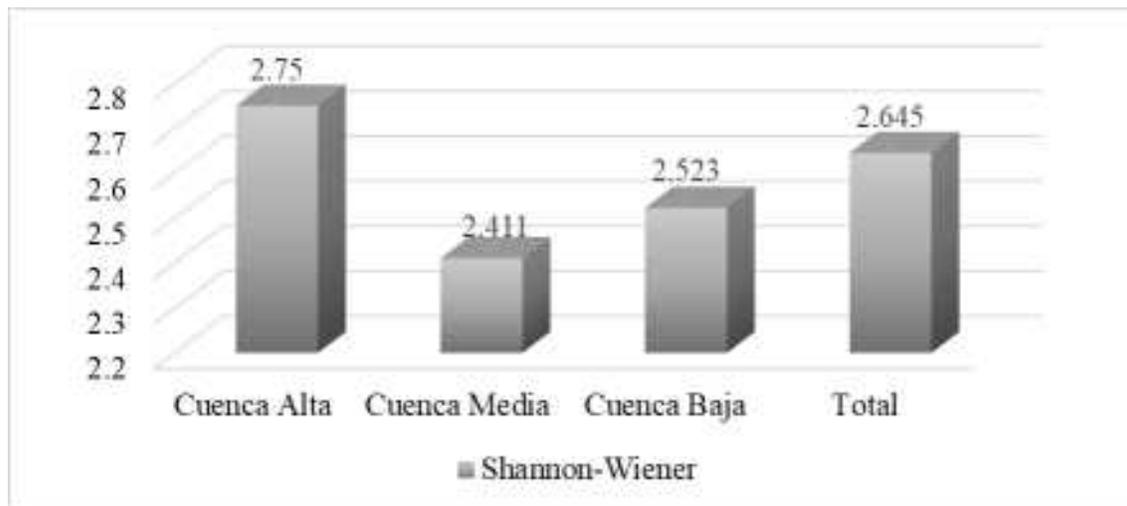
Esta diferencia de abundancia podría estar relacionada con actividades antropogénicas propias de la región, como la ganadería y la agricultura. Estas actividades han sido asociadas con una significativa pérdida de la biodiversidad, lo que altera el funcionamiento de los ecosistemas ribereños (Reid *et al.*, 2019). Cornejo *et al.* (2021) señalan que la contaminación por escorrentía de pesticidas puede afectar a la población de organismos detritívoros y que el uso de insecticidas altera el ensamblaje de los descomponedores microbianos e hifomicetos acuáticos en las hojas, afectando el flujo energético del ecosistema. A pesar de que la

abundancia total de la cuenca alta fue baja, el índice de Shannon-Wiener alcanzó un valor de 2.75, lo que corresponde a una biodiversidad alta según los valores establecidos por Villarreal *et al.* (2004). En contraste, la cuenca media y baja respectivamente presentaron una biodiversidad media (ver Figura 6).

Por otro lado, el análisis de la biodiversidad total en el río Caimito arrojó un valor de 2.65, lo que indica una diversidad media de hifomicetos acuáticos (ver Figura 6). Aunque el ecosistema muestra una biodiversidad media, no alcanza un nivel de alta diversidad. Esto sugiere que el ecosistema acuático presenta un equilibrio relativo en términos de diversidad, pero podría estar siendo afectado por actividades antropogénicas, lo que puede limitar una mayor diversidad.

Figura 6.

Diversidad de hifomicetos acuáticos en las cuencas del río Caimito basado en el índice de Shannon-Wiener.

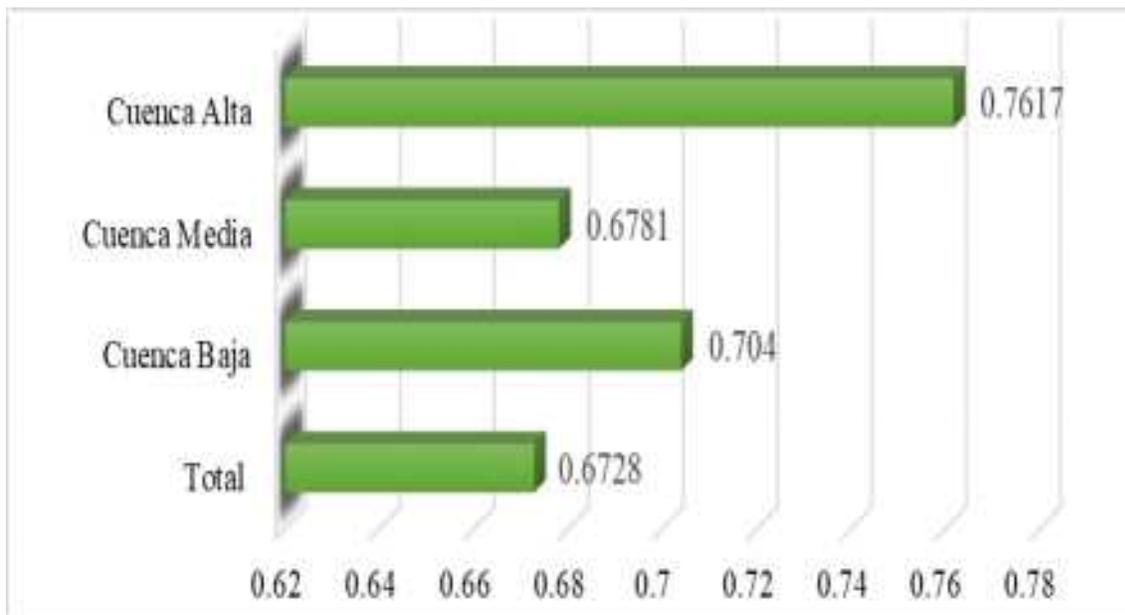


Los resultados del análisis de uniformidad indican que la distribución de la abundancia de especies no es equitativa entre las cuencas, ya que los valores obtenidos no son cercanos a 1 (ver

Figura 7). Según Magurran (1988), el valor de 1 corresponde a una situación donde todas las especies son igualmente abundantes. Esto sugiere que algunas especies son dominantes que otras en el ecosistema, lo que podría estar relacionado con factores ambientales o antropogénicos que influyen en los hifomicetos acuáticos.

Figura 7.

Uniformidad de la distribución de hifomicetos acuáticos en el río Caimito.



CONCLUSIONES

Esta investigación reportó por primera vez la presencia de 10 nuevas especies de hifomicetos acuáticos en Panamá.

La biodiversidad total de estos hongos en las cuencas del río Caimito se determinó como de nivel medio.

Además, se registró una mayor abundancia de hifomicetos en las cuencas media y baja en comparación con la cuenca alta. Lo que sugiere que posiblemente esta última está siendo afectada por actividad antropogénica.

Se encontraron diferencias altamente significativas en la frecuencia de estos hongos entre los tipos de sustrato (espuma y hojas sumergidas), así como entre las cuencas alta, media (de carácter rural) y baja (urbanizada) del río Caimito.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos al señor Carlos Villareal, propietario de la finca lechera “Las Praderas”, y al señor Juan Guerra por su hospitalidad y confianza al permitirnos el acceso a sus propiedades para llegar a la cuenca alta y media del río Caimito. Al Ministerio de Ambiente de Panamá (MiAmbiente) agradecemos el otorgamiento del permiso de colecta ARB-069-2022 para la recolecta de hongos y sus respectivos sustratos en la provincia de Chiriquí.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bärlocher, F. (1992). *The ecology of aquatic hyphomycetes*. Berlín, Alemania: Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-76855-2>.
- Bärlocher, F., Helson, J. E. & Williams, D. (2010). Aquatic hyphomycete communities across a land-use gradient of Panamanian streams. *Fundam. Appl. Limnol., Arch. Hydrobiol.*, 177(3), pp. 209-221. DOI: 10.1127/1863-9135/2010/0177-0209.
- Bärlocher, F. & Marvanová, L. (2010). Aquatic hyphomycetes (Deuteromycotina) of the Atlantic Maritime Ecozone. In: *Assessment of species diversity in the Atlantic Maritime Ecozone*, eds. D. F. McAlpine & I. M. Smith . Canada: NRC Research Press, pp. 1-37.
- Burgos , J. & Shearer, C. (1983).Hyphomycetes acuáticos de Magallanes (Chile). *Boletín Micológico*, 1(3), pp. 143-146. <https://doi.org/10.22370/bolmicol.1983.1.3.1449>.
- Cáceres, O. A., Castillo, S. Y. & Hofmann, T. A. (2015). Hifomicetos acuáticos asociados a hojarasca sumergida en el río Majagua, Chiriquí, Panamá. *Rev. Mex. de Mic.*, Volumen 42, pp. 65-69.
- Cepero de García, M. C. *et al.* (2012). Hongos anamorficos, conidiales, mitosporicos o "Deuteromycetes". In: *Biología de Hongos*. 1 ed. Colombia: Universidad de los Andes, pp. 120-146.
- Chan, S. Y., Goh, T. K. & Hyde, K. D. (2000.) Ingoldian fungi in Hong Kong. *Fungal Diversity*, Volume 5, pp. 89-107.
- Cornejo, A. *et al.* (2021). Litter decomposition can be reduced by pesticide effects on detritivores and decomposers: Implications for tropical stream functioning. *Environmental Pollution*, Volume 285, pp. 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.117243>.
- Dang, C. K., Gessner, M. O. & Chauvet, E. (2007). Influence of conidial traits and leaf structure on attachment success of aquatic hyphomycetes on leaf litter. *Mycologia*, 99(1), pp. 24-32. <https://doi.org/10.1080/15572536.2007.11832597>.
- Descals, E., Sanders, P. F. & Ugalde, U. (1977). Hifomicetos ingoldianos del país vasco. *Sociedad de Ciencias Aranzadi*, 3(4), pp. 237-260.

- Fernández, R., Briedis, G. & Pinto, M. (2010). Características e importancia de los hifomicetos acuáticos y registro de especies en Venezuela. *Faraute Ciens. y Tec.*, 5(2), pp. 56-73.
- Fernández, R. & Smits Briedis, G. (2024). Hifomicetos acuáticos en "México, América Central y el Caribe" y su potencial aplicación como bioindicadores de calidad ambiental. *Gestión y Ambiente*, 26(1), pp. 1-25. <https://doi.org/10.15446/ga.v26n1.106993>.
- Fernández, R. & Smits, G. (2020). Hifomicetos acuáticos como bioindicadores de calidad ambiental en el río Vigirima (Guacara, Carabobo-Venezuela). *Gestión y Ambiente*, 23(2), pp. 165-181. <https://doi.org/10.15446/ga.v23n2.95686>.
- Fernández, R., Vincenzo, S. & Smits, G. (2017). Evaluación de los hifomicetos acuáticos como bioindicadores de calidad ambiental en el río Chirgua (Bejuma, Venezuela). *Gestión y Ambiente*, 20(1), pp. 82-94. <https://doi.org/10.15446/ga.v20n1.62241>.
- Ferreira, V. *et al.* (2016). Leaf litter decomposition in remote oceanic island streams is driven by microbes and depends on litter quality and environmental conditions. *Freshwater Biology*, 61(2), pp. 783-799. <https://doi.org/10.1111/fwb.12749>.
- Gönczöl, J. & Révay, Á. (2003). Treehole fungal communities: aquatic, aero-aquatic and dematiaceous hyphomycetes. *Fungal Diversity*, Volume 12, pp. 19-34.
- Gulis, V., Marvanová, L. & Descals, E. (2005). An illustrated key to the common temperate species of aquatic hyphomycetes. In: *Methods to Study Litter Decomposition*, eds. F. Bärlocher, M. O. Gessner & M. A. Graça. 2 ed. Netherlands: Springer, pp. 223-239. https://doi.org/10.1007/978-3-030-30515-4_25.
- Hammer, O. (2020). *PAST (Paleontological Statistics), Versión 4.05*. México: Windows 10.
- IBM, (2021). *SPSS Statistics, Versión 23.0*. EE.UU: Windows 10.
- Ingold, C. T. (1975). An illustrated guide to aquatic and water-borne hyphomycetes (fungi imperfecti) with notes on their biology. *Freshwater Biol. Assoc. Publ.*, Volume 30, pp. 1-96.
- Iqbal, S. H. (1997). Species diversity of freshwater hyphomycetes in some streams of Pakistan. II. Seasonal differences of fungal communities on leaves. *Ann. Bot. Fennici*, 34(3), pp. 165-178. <https://www.jstor.org/stable/23726496>.

- Jabiol, J., Julien, F. & Labeille, M. (2024). Aquatic hyphomycetes and litter decomposition in tropical streams: insights from the first study in Guadeloupe. *Hydrobiologia*, Volume 851, pp. 4487-4501. <https://doi.org/10.1007/s10750-024-05602-6>.
- Magurran, A. E. (1988). *Ecological Diversity and its Measurement*. 1 ed. New Jersey: Springer Science & Business Media. <https://doi.org/10.1007/978-94-015-7358-0>.
- Pinto, M., Fernández, R. & Smits, G. (2009). Comparación de métodos de muestreo en la caracterización de la biodiversidad de hifomicetos acuáticos en el río Cúpira, estado Carabobo, Venezuela. *Interciencia*, 34(7), pp. 497-501.
- Rasband, W. & Contributors National Institutes of Health, (2023). *Fiji is just ImageJ. Version 2.14.0*. EE.UU: Windows 10.
- Reid, A. J. *et al.* (2019). Emerging threats and persistent conservation challenges for freshwater biodiversity. *Biol. Rev.*, 94(3), pp. 849-873. <https://doi.org/10.1111/brv.12480>.
- Rivera, G. D. (2021). Diversidad de hyphomycetes acuáticos en hojarasca sumergida y espuma de la cuenca del río Palo Alto, Boquete, Chiriquí - Panamá. Tesis de Grado. *Universidad Autónoma de Chiriquí*, pp. 1-137.
- Roldán, A., Descals, E. & Honrubia, M. (1987). Hifomicetos acuáticos en las cuencas altas de los ríos Segura y Guadalquivir. *Anales de Biología*, Volumen 13, pp. 3-13. <https://revistas.um.es/analesbio/article/view/34871>.
- Roldán, A., Descals, E. & Honrubia, M. (1988). Hifomicetos acuáticos de Sierra Nevada y Sierra de los Filabres. *Acta Botanica Malacitana*, Issue 13, pp. 77-90.
- Santos-Flores, C. J. & Betancourt-López, C. (1997). Aquatic and waterborne hyphomycetes (Deuteromycotina) in streams of Puerto Rico (including records from other Neotropical locations). *Caribbean Journal of Science*, Issue 2, pp. 1-116.
- Schoenlein-Crusius, I. H. & Grandi, R. A. P. (2003). The diversity of aquatic hyphomycetes in South America. *Braz. J. Microbiol.*, 34(3), pp. 183-193. <https://doi.org/10.1590/S1517-83822003000300001>.
- Shearer, C. A. *et al.* (2007). Fungal biodiversity in aquatic habitats. *Biodivers. Conserv.*, Volume 16, pp. 49-67. <https://doi.org/10.1007/s10531-006-9120-z>.

- Sridhar, K. (2005). Freshwater hyphomycetes -concepts and connections. *Kavaka*, Volume 33, pp. 9-20.
- Storaci, V., Fernández , R. & Smits, G. (2013). Evaluación de la calidad del agua del río Cúpira (La Cumaca, estado Carabobo, Venezuela) mediante bioindicadores microbiológicos y parámetros fisicoquímicos. *Interciencia*, 38(7), pp. 480-487. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=33928556002>.
- Urriola , G. A. (2017). Diversidad de hyphomycetes acuáticos en hojarasca sumergida y espuma de la cuenca del río Macho de Monte, Chiriquí, Panamá. Tesis de Maestría. *Universidad Autónoma de Chiriquí*, pp. 1-104.
- Villarreal, H. *et al.* (2004). *Manual de métodos para el desarrollo de inventarios de biodiversidad. Programa de inventarios de Biodiversidad*. 2 ed. Bogotá, Colombia: Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander Von Humboldt.
- Wood, S. & Bärlocher, F. (1983). Aquatic hyphomycetes in sixteen streams in France, Germany and Switzerland. *Trans. Br. Mycol. Soc.*, 81(2), pp. 371-379. [https://doi.org/10.1016/S0007-1536\(83\)80089-8](https://doi.org/10.1016/S0007-1536(83)80089-8).



Caracterización de periodos de suelo y estimación de efecto de sitio en el Casco Antiguo de la Ciudad de Panamá como apoyo a la preservación del patrimonio histórico de Panamá

Characterization of the site effect with the Nakamura technique in the Panama City Old Quarter as support for the preservation of Panama historical heritage of

Néstor Luque

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

nestor.luque@up.ac.pa

<https://orcid.org/0000-0003-4564-1947>

Javier Francisco Lermo Samaniego

Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería, México.

jlermos@iingen.unam.mx,

<https://orcid.org/0000-0002-5336-5332>

Julissa Sanjur

Universidad de Panamá, Facultad de Ingeniería, Panamá.

julissa.sanjur@up.ac.pa

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

Arkin Tapia

Universidad de Panamá, Instituto de Geociencias, Panamá.

arkin.tapiae@up.ac.pa

<https://orcid.org/0000-0003-2355-4615>

Héctor Pineda

Universidad de Panamá, Instituto de Geociencias, Panamá.

hector.pineda-s@up.ac.pa

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

Johnny Gil

Universidad de Panamá, Instituto de Geociencias, Panamá.

johnny.gils@up.ac.pa

<https://orcid.org/0009-0001-8887-5236>

Yadira Echeverria

Universidad de Panamá, Instituto de Geociencias, Panamá.

yadira.echeverriad@up.ac.pa

<https://orcid.org/0009-0007-6681-5025>

Fecha de recepción: 13 de marzo de 2025

Fecha de aceptación: 22 de mayo 2025

DOI: <https://doi.org/10.48204/j.tecno.v27n2.a7674>

RESUMEN

Las zonas propensas a la generación de terremotos que dejan daños considerables requieren de estudios de amenaza sísmica. Hacer un análisis del efecto de sitio es uno de los parámetros más importantes en este proceso. Para conocer el efecto de sitio existen diversas técnicas, una de ellas es la metodología empírica de la razón espectral H/V (es decir, la razón entre el espectro de amplitudes de Fourier de las componentes horizontal y vertical de microsismos). La técnica desarrollada por Nogoshi & Igarashi (1971) y difundida por Nakamura (1989) como la relación espectral H/V, permite la obtención de los periodos fundamentales del suelo en la región de estudio. Esta es una de las técnicas que emplean microtemores para la microzonificación sísmica (Rivera-Alvarez, 2019).

Aplicamos esta técnica en diferentes puntos, especialmente cerca de edificaciones de importancia, en el Casco Viejo de la Ciudad de Panamá como apoyo a la preservación del patrimonio histórico de Panamá, con sismómetros banda ancha. Teniendo como resultado suelos que en su mayoría comprenden suelos duros a compactos con periodos cortos, menores a 0.25 segundos.

PALABRAS CLAVE

Ondas sísmicas, dinámica de suelos, Geotecnia, patrimonio histórico, Panamá.

ABSTRACT

Areas prone to the generation of earthquakes that leave considerable damage require seismic hazard studies. Performing a site effect analysis is one of the most important parameters in this process. To know the site effect, there are various techniques, one of them is the empirical methodology of the H/V spectral ratio (that is, the ratio between the Fourier amplitude spectrum of the horizontal and vertical components of microseisms). The technique developed by Nogoshi and Igarashi (1971) and disseminated by Nakamura (1989) as the H/V spectral ratio, allows obtaining the fundamental periods of the ground in the study region. This is one of the techniques that microtremors use for seismic microzonation (Rivera-Alvarez, 2019).

We apply this technique at different points, especially near important buildings, in the Casco Viejo of Panama City as support for the preservation of the historical heritage of Panama, with broadband seismometers. Resulting in soils that mostly comprise hard to compact soils with short periods, less than 0.25 seconds.

KEY WORDS

Seismic waves, soil dynamics, Geotechnics, historical heritage, Panama

INTRODUCCIÓN

La respuesta de una estructura sometida a acciones dinámicas en general y en particular a terremotos, depende fundamentalmente de las características de la estructura y el suelo donde está emplazado (Bazán et al., 1992; Kramer & Stewart, 2024).

Las condiciones locales propias de cada emplazamiento, como son: la naturaleza de los suelos, la topografía, la profundidad del basamento y del nivel freático, etc., pueden producir variaciones en las ondas sísmicas, en espacio, amplitud, contenido de frecuencia y duración, al propagarse dentro del entorno geográfico considerado. El conocimiento de estos fenómenos, también llamados efectos de sitio se consideran de gran importancia para la planificación y el diseño sismorresistente de las edificaciones (Chávez, 2014; Kramer & Stewart, 2024).

Debido que en muchas partes del mundo los sismos no son muy frecuentes, por lo cual habría que esperar décadas para hacer estimaciones de respuesta local de los suelos bajo una ciudad o zona urbana, en las últimas décadas ha tomado un gran auge el uso de los microtemores, microtrepidaciones, ruido sísmico de fondo o el ruido sísmico ambiental para estimar la respuesta local de sitio haciendo uso de la técnica de las tasas espectrales o HVSR. Esta técnica fue popularizada por Nakamura (1989), y se usa para determinar la frecuencia natural de vibración del terreno en un espacio de tiempo corto y a un bajo costo (Cara et al., 2008; Duval et al., 2001; Lebrun et al., 2001; Lermo et al., 1988; Lermo et al., 1993; Panou et al., 2005; Yamazaki y Anzari, 1997). Además, se ha comprobado que los resultados de esta técnica se correlacionan con la distribución espacial de daños por sismo, cuando los mismos son controlados por la geología superficial somera (Lachet et al., 1996; Teves-Costa et al., 2001).

El suelo esta siempre moviéndose ligeramente bajo influencia de golpes, desplazamientos o traslación de masas de origen natural o cultural. Se conocen como microtemores al ruido sísmico ambiental o de fondo de periodo corto, producto de fuerzas aleatorias y superficiales. Experimentos numéricos indican que estos son en esencia ondas superficiales tipo Rayleigh (de origen atmosférico, oceánico y artificial) propagadas lateralmente en todas las direcciones. La experiencia y sugerencia de Nakamura (1989) está basada en obtener datos empíricos de la oscilación ambiental, y dar información de la frecuencia natural del terreno, al dividir el espectro de amplitud de Fourier del movimiento horizontal entre el vertical.

Debido a la relación que existe entre la naturaleza de los microtemores y el comportamiento dinámico de las capas superficiales de los suelos, esas pequeñas vibraciones son empleadas en el campo de la ingeniería sísmica, con la finalidad de caracterizar los suelos y estructuras, determinando la función de transferencia, la cual incluye información referente a los periodos

predominantes. De las diferentes técnicas que emplean microtemblores para la microzonificación sísmica, la técnica desarrollada por Nogoshi & Igarashi (1971) y difundida por Nakamura (1989) como la relación espectral H/V, permite la obtención de los periodos fundamentales del suelo en la región de estudio. El producto final es la generación de mapas de isoperiodos predominantes del suelo, mediante los Sistemas de Información Geográfica (SIG).

Considerando la importancia de la preservación del patrimonio histórico de Panamá, el contexto geodinámico de la región y su exposición a la amenaza sísmica se plantea realizar una zonificación en el sector del Casco Antiguo de la Ciudad de Panamá, como apoyo para mitigar el riesgo a pérdida de los edificios históricos e incluso vidas humanas.

ANTECEDENTES

Al igual que en otras partes del mundo (Schmidt-Díaz & Esquivel-Salas, 2024; Uyanik, 2023) en Panamá se han realizado varios estudios de microzonación sísmica (Grajales et al., 2023; Guardia et al., 2012; Lermo et al., 2014;)

Por lo tanto, cuando las ondas del sismo se ven modificada por las características geológicas y topográficas en un punto dado, y las mismas se encuentren en la parte somera del subsuelo durante y después de un sismo se le conoce como efecto de sitio. Por lo general, esta modificación actúa principalmente amplificando la señal y hacen que estas tengan una mayor duración. Para zonas que presenten grandes densidades de construcción de edificaciones esto puede ser devastador, produciendo grandes daños a estas.

Existen diversas técnicas para conocer el efecto de sitio, estas pueden ser directas, empíricas y numéricas. En este estudio se empleará la técnica empírica, específicamente razón espectral utilizando vibraciones ambientales, H/V.

Ruido sísmico ambiental

También conocidos como microtemblores, microtrepidaciones, microtemblores, oscilaciones omnipresentes y ruido de fondo. Son vibraciones aleatorias inducidas en las masas de suelo y roca por fuentes naturales y artificiales definido por Gascón (2009). Estas se observan en un rango de frecuencia entre 0,001 a 30 Hz.

Las vibraciones pueden ser naturales o microsismos y de origen artificial o macrosismos, las primeras están relacionadas a las fuentes internas de la Tierra como actividad tectónica y a fuentes externas como actividad de las mareas, el viento y otras, siendo comunmente de baja frecuencia. La segunda por la actividad humana (actividades industriales y tráfico) de alta frecuencia (Ritta et al., 2012).

Periodo fundamental del suelo

Es un indicador para conocer el efecto de sitio en una zona determinada, y es uno de los más utilizados por la comunidad científica a nivel mundial. El tiempo que tardan las vibraciones en dar su ciclo completo en determinado entorno del subsuelo se le conoce como periodo fundamental, o su inversa, la frecuencia fundamental.

Las modificaciones que sufre el suelo ante un evento sísmico son principalmente las fuertes amplificaciones. Suelos blandos con grandes potencias (espesores) tienen tendencias a generar mayores periodos fundamentales, predominando mayores amplificaciones.

Técnica Nakamura

Una de las técnicas empíricas de estimación del efecto de sitio donde la medición, procesamiento e interpretación de ruido ambiental, es parte del procesado, es el método de Nakamura. Esta técnica se basa en la interpretación de los espectros de Fourier de las componentes horizontales y verticales de microtremores, como ondas superficiales Rayleigh, las cuales se propagan en una capa blanda de sedimentos sobre un medio rocoso (Gascón, 2009).

Según Rivera-Alvarez (2019) La razón espectral H/V (es decir, la razón entre el espectro de amplitudes de Fourier de las componentes horizontal y vertical de microsismos) fue introducida primeramente por Nogoshi e Igarashi (1971) y extendida por Nakamura (1989, 1996, 2000).

En todo momento, las capas de sedimento, así como las rocas están sometidas a vibraciones ambientales, las cuales pueden ser clasificadas en dos principales categorías: las naturales y las artificiales.

La superficie de los suelos siempre está vibrando con periodos de 0,1 a 10 segundos. La distinción entre el ruido de largo periodo ($T > 1$ s) y de corto periodo ($T < 1$ s) corresponde a la distinción tradicional entre microsismos de origen natural, y microtremores de origen artificial, respectivamente.

Es importante resaltar que en la denominación actual de microtremores se incluyen los de corto periodo y los de largo periodo, es decir, los debidos a las actividades humanas y los debido a causas naturales.

Nakamura (1989) se basó en las siguientes suposiciones:

- Los microtemores están compuestos por diferentes tipos de ondas, en especial de ondas Rayleigh, que se propagan en una capa blanda de sedimentos que yace sobre un medio rocoso. El efecto, de estas ondas, es igual tanto para las componentes verticales como para las horizontales en superficie.
- La amplificación del efecto de sitio es debido a una capa que se ubica por encima de una capa considerada como “espacio infinito”, donde la excitación está dada por un plano armónico de onda S. La componente vertical del movimiento no se amplifica por la capa sedimentaria.
- Igualmente, supone que las fuentes profundas son despreciadas y por lo tanto, el movimiento es debido a fuentes locales, las cuales no afectan el movimiento de los microtemores en la base de la capa de sedimentos.

METODOLOGÍA

Ubicación de la zona de estudio

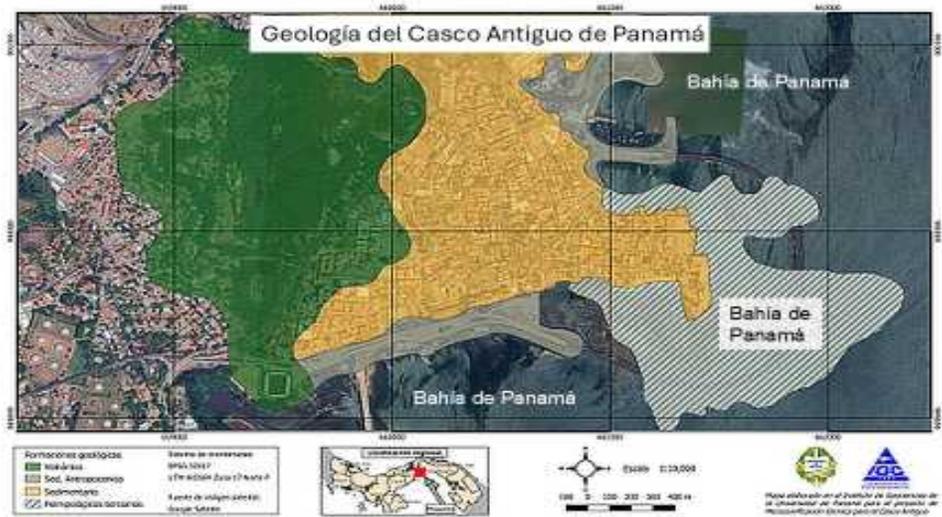
Este estudio hace parte del distrito de Panamá, comprenden los corregimientos de San Felipe, El Chorrillo y Santa Ana, especialmente de la zona del Casco Antiguo. Entre las coordenadas UTM 659000 E / 989000 N como punto suroccidental y 662000 E / 991000 N como el extremo nororiental (Ver figura 1)

La geología de la zona de estudio está en su totalidad compuesta de rocas sedimentarias, de depósitos aluviales y marinos, además de rellenos (Ver figura 2). Esto contrasta con la información del mapa geológico presentado en el Atlas Nacional del Instituto Geográfico Nacional del Tommy Guarda.

Figura 1.
Corregimientos de la zona de estudio



Figura 2.
Formaciones geológicas del Casco Antiguo de la ciudad de Panamá tomadas en campo.



Recolección de datos

Como primera parte de este estudio se recopiló información bibliográfica asociada a la geología del área bajo estudio, trabajos previos de microzonificación sísmica desarrollándose en Panamá y en la región, el fundamento de la técnica de Nakamura, la geotecnia, aspectos geofísicos, entre otros.

A partir de la hoja topográfica, a escala 1:25 000 de la Ciudad de Panamá, cuyo código es 4242 I NE, elaborada por el Instituto Geográfico Nacional Tommy Guardia, se digitalizaron los principales elementos como curvas de nivel, carreteras, edificios, parques. Posteriormente se realizó una selección de probables sitios en los corregimientos de San Felipe, El Chorrillo y Santa Ana, para hacer las mediciones en campo abierto; ponderando el nivel de riesgo, el acceso por ciertas calles y el tráfico vehicular. En este sentido se seleccionaron cerca de 30 puntos a los cuales se podía tener acceso (ver figura 3).

Figura 3.

Polígono a trabajar en el Casco Antiguo de la ciudad de Panamá.



En la fase de campo se utilizaron equipos sismómetros de banda ancha de 3 componentes (dos sismómetros GURALP SYSTEMS, triaxiales de periodo largo, CMAG-6TD y un sismómetro Nanometrics triaxial de periodo 120 segundos, TRILIUM COMPACT 120P) con sus respectivos digitalizadores. En los puntos seleccionados llevamos a cabo mediciones con un tiempo de muestreo de 30 minutos.

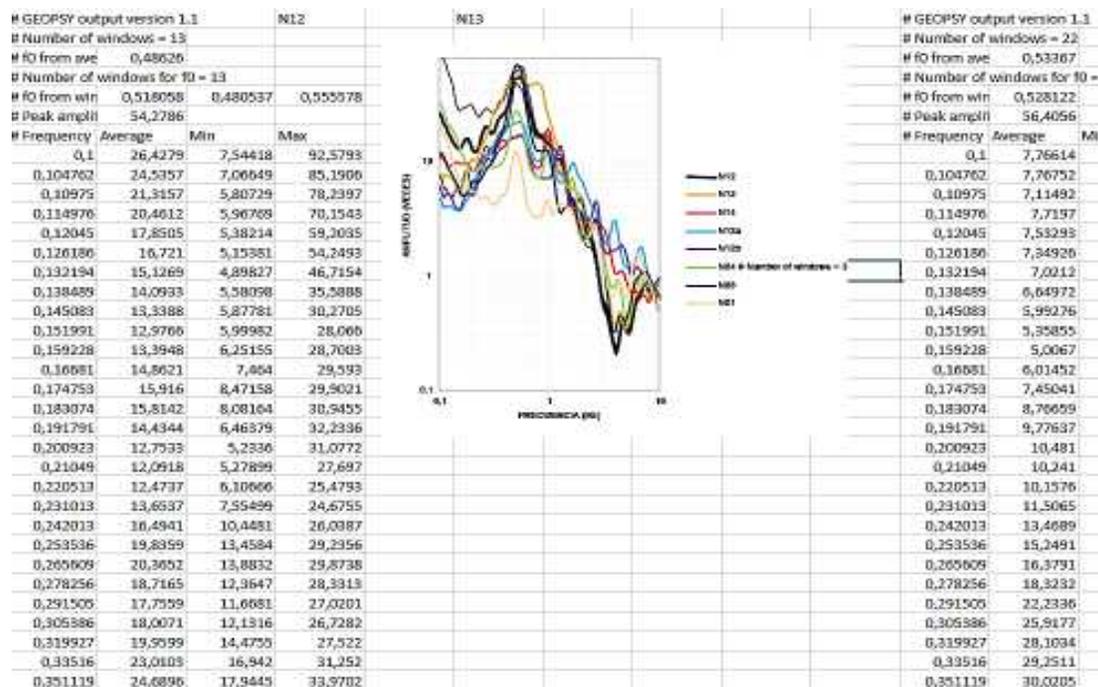
En el lugar se revisaba que los datos adquiridos cumplieran con la calidad requerida para el posterior procesamiento con la técnica, en caso contrario, se repetía la medición.

En la fase de oficina, mediante los sistemas de información geográfica, se crearon las capas geoespaciales con los puntos de muestreo, requeridos para la elaboración del mapa de isoperiodos de los suelos. También mediante el programa Geopsy, que procesa ondas sísmicas, se extrajo la información de las frecuencias obtenidas en el área de estudio.

A continuación, utilizando la información de las tablas, obtuvimos las amplitudes y los períodos mediante el cálculo del inverso de la frecuencia. Se obtuvo información sobre la frecuencia, las amplitudes y los períodos (ver figura 5).

Figura 4.

Vista de los datos tabulares de algunas de las mediciones en campo tales como: Frecuencia promedio, máxima y mínima.



RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Tabla 1 aparecen los periodos fundamentales en los sitios seleccionados en el Casco Antiguo de la ciudad de Panamá, cada uno está georreferenciado en coordenadas UTM.

Tabla 1.

Periodos fundamentales en la zona de estudio, en coordenadas UTM WGS84 Zona 17 Norte P.

Nombre	Frecuencia (Hz)	Período (s)	Amplitud	x	y
pe49	10.5	0.095	2.1	660829.68	990189.48
pe50	6.5	0.154	2.8	660793.76	990549.45
pe34	3.4	0.294	1.3	661259.81	990091.59
pe33	1.1	0.909	1.3	660930.3	990030.39
pe31	6.1	0.164	1.1	661140.54	989990.52
pe30	11.1	0.09	1.8	661191.32	989803.31
pe29	11.1	0.09	2	661091	989945
pe17	4.2	0.238	3.3	661387.21	989630.07
pe14	17	0.059	3.7	661355.31	989858.05
pe15	6.8	0.147	4.3	660825.5	989868.02
pe12	8.5	0.118	1.5	660835.71	989752.75
pe11	4.2	0.238	5.7	660833.87	989837.03
pe28-	4.5	0.222	8.5	661230.04	990006.67
canco	3.4	0.294	1.8	659799.91	990175.02
pe45	4.4	0.227	1	660559.85	989936.09
pe47	7.6	0.132	1.6	660288.29	990117.02
pe48	3.4	0.294	1.6	660052.66	990263.4
pe53	6.2	0.161	1.1	660475.68	990285.4
pe51	6.5	0.154	1.7	660715.41	990652.09
pe372	9.4	0.106	1.8	659544.91	989313.8
pe38	3.8	0.263	1.4	659646.93	989533.94
pe39	5.5	0.182	2	659817.3	989715.8
pe40	12	0.083	1.5	660027.65	989901.32
pe42	5.5	0.182	1.8	659895.77	989508.52
pe43	4	0.25	2.8	660271.53	989571.46

En la figura 6 se puede observar la distribución de las frecuencias promedio y mediante modelo de interpolación IDW utilizando QGIS, se elaboró el mapa de isoperiodos como podemos observar en la figura 7.

En el área del Casco Antiguo predominan suelos duros con periodos cortos teniendo como resultado una baja amenaza por amplificación, aunque existen zonas de rellenos, las estructuras están emplazadas en suelos con buen comportamiento ante sismos.

Figura 5.

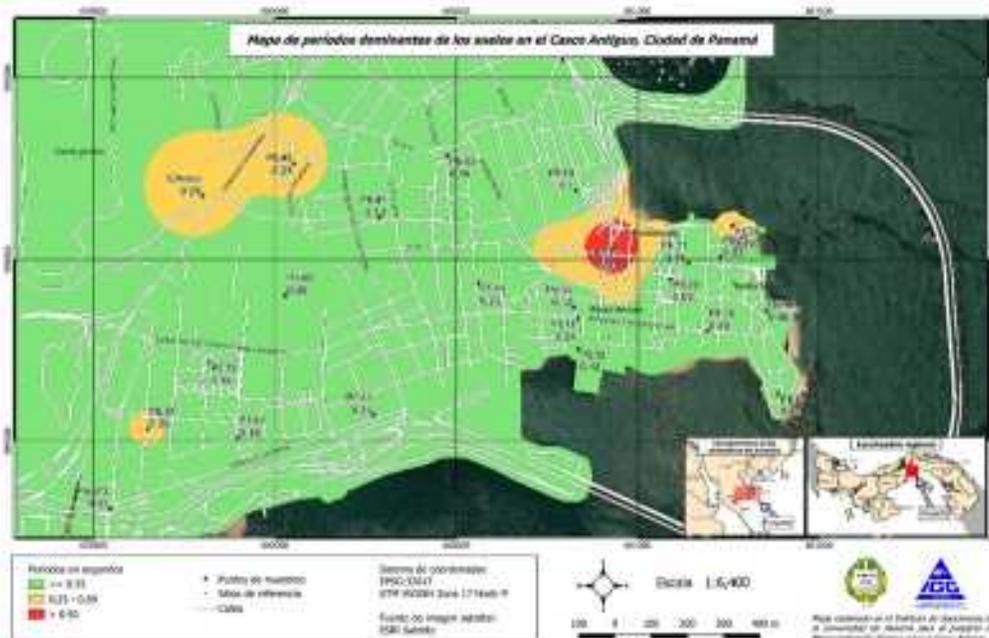
Se puede observar la distribución de los puntos de muestreos



Figura 6.
Puntos de frecuencias promedio en la zona de estudio.



Figura 7.
Modelo de periodos dominantes de suelo para la zona del Casco Antiguo, Panamá.



CONCLUSIONES

Los resultados del estudio corroboran que el uso de los sismómetros banda ancha permite adquirir datos confiables para realizar el cálculo de los isoperiodos del suelo.

Se debe hacer estudios comparativos en Panamá de la señal de los instrumentos sismómetros y comparar los resultados obtenidos con los acelerómetros en la determinación de los periodos de suelo.

Geológicamente la zona presenta rocas sedimentarias, depósitos marinos y aluviales, además de zonas de rellenos como toda ciudad en desarrollo, pero en este estudio no se encontraron zonas de roca suave.

En la zona predominan periodos cortos, menores de 0.25 segundo. Los suelos asignados a estos periodos tienen bajas amplificaciones, comprenden roca dura. Se debe recopilar la información geotécnica de la zona de estudio y en especial hacer refracción sísmica o velocidad de onda de corte para poder hacer una clasificación de suelo, que al relacionar con los periodos predominantes permita determinar el efecto de sitio.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Atlas Nacional de la República de Panamá (2016). Instituto Geográfico Nacional Tommy Guardia (IGNTG).
- Bazán, E. y Meli, R. (1992). Manual de diseño sísmico de edificios. Editorial Limusa S. A., México.
- Cara F.; Cultrera, G., Azzara, R.M., De Rubeis, V., Di Giulio, G., Giammarinaro, M.S. Tosi, P. Vallone, P., & Rovelli, A. (2008). Microtremor Measurements in the City of Palermo, Italy: Analysis of the Correlation between Local Geology and Damage. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 98, No. 3, pp. 1354–1372
- Chávez-García, F. J., & Montalva, G. A. (2014). Efectos de sitio para Ingenieros Geotécnicos, estudio del valle Parkway. *Obras y proyectos*, (16), 6-30.
- Duval, A. M., S. Vidal, J.-P. Méneroud, A. Singer, F. De Santis, C. Ramos, G. Romero, R. Rodríguez, A. Pernia, N. Reyes, and C. Griman (2001). Caracas, Venezuela, site effect determination with microtremors, *Pure Appl. Geophys.*, 158, 2513–2523.
- Gascón, P. (2009). Caracterización geofísica mediante estudio de ruido sísmico ambiental,

área metropolitana del estado Anzoátegui (Tesis Doctoral no publicada), Universidad Central de Venezuela.

Grajales-Saavedra, F., Mojica, A., Ho, C., Samudio, K., Mejía, G., Li, S., Almengor, L., Miranda, R., & Muñoz, M. (2023). Horizontal-to-Vertical Spectral Ratios and Refraction Microtremor Analyses for Seismic Site Effects and Soil Classification in the City of David, Western Panama. *Geosciences*, 13, 287. <https://doi.org/10.3390/geosciences13100287>

Guardia, R., Camacho-Astigarrabia, E., Luque, N., Tapia, A., Echeverria, Y., & Anguizola, E. (2012). Modelación Probabilista del Riesgo Sísmico en la Ciudad de David, CAPRA Informe Técnico. Panamá. <https://doi.org/10.13140/2.1.2667.2167>

Kramer, S.L., & Stewart, J.P. (2024). *Geotechnical Earthquake Engineering*, 2nd. Ed. CRC Press.

Lachet, C., D. Hatzfeld, P.-Y. Bard, N. Theodulidis, C. Papaioannou, and A. Savvaidis (1996). Site effects and microzonation in the city of Thessaloniki (Greece) comparison of different approaches, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 86, 1692 - 1703.

Lebrun, B., Hatzfeld, D. & Bard, P.Y. (2001). A site effect study in urban area: experimental results in Grenoble (France), *Pure Appl. Geophys.*, 158, 2543–2557.

Lermo S., J.; Rodríguez, M., & Singh, K. (1988). Observaciones de Microtemblores y su Aplicación en la Ingeniería Sísmica. *Revista Geofísica 128, IPGH*. 123-143.

Lermo, J. & Chávez-García, F.J. (1993). Site effect evaluation using spectral ratios with only one station, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 83, 1574 - 1594.

Lermo-Samaniego, J., Camacho-Astigarrabia, E., Martinez-Gonzalez, J. A., Carbajal-Becerril, E., Luque, N. Tapia, A., Chichaco. E., Gil, J., Echeverria, Y., & Palma R. (2014). Microzonificación sísmica de la ciudad de Panamá, Panamá. Informe Técnico para el Centro de Coordinación para la Prevención de los desastres Naturales en América Central (CEPRENAC).

Nakamura, Y. (1989) A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface. Quarterly Report of Railway Technical Research, 30(1), 25-33. Recuperado de <http://www.rtri.or.jp/eng/>

Nakamura, Y. (1996). Real-time information systems for hazards mitigation. In Proceedings of the 11th World Conference on Earthquake Engineering. Acapulco, Mexico.

- Nakamura, Y. (2000). Clear identification of fundamental ideas of Nakamura's technique and its applications. In Proceedings of the 12th World Conference on Earthquake Engineering. Auckland, New Zealand.
- Nogoshi, M. & Igarashi, T. (1971). On the amplitude characteristics of microtremor (part 2). *Journal of Seismological Society of Japan*, 24(1), 26-40. Recuperado de Doi https://doi.org/10.4294/zisin1948.24.1_26
- Panou, A., Theodulidis, N., Hatzidimitriou, P., Savvaidis, A., & Papazachos, C. (2005). Reliability of ambient noise horizontal-to-vertical spectral ratio in urban environments: the case of Thessaloniki city (northern Greece), *Pure Appl. Geophys.* 162, 891–912.
- Ritta, R. J., Suárez, L. E., & Pando, M. A. (2012). Determinación del período fundamental del suelo usando vibración ambiental y el cociente espectral horizontal/vertical. *Mecánica computacional*, 31(8), 1399-1419.
- Rivera-Álvarez, Z. C., & Pérez-Aleman, H. A. (2019). Evaluación de los efectos de sitio a partir de la razón espectral h/v de microsismos en zonas aledañas a la bahía de Santiago de Cuba. *Ciencia en su PC*, 1(4), 1-15.
- Schmidt-Díaz, V., & Esquivel-Salas, L. C. (2023). Período fundamental y clasificación de sitios en el cantón Central de San José (Costa Rica) usando la técnica H/V. *Revista geológica De América Central*, 68, 1–17. <https://doi.org/10.15517/rgac.2023.55170>
- Tenorio, C. (1997). Site Response Evaluation: A review of the problem Involved, Estimation Techniques, and Nakamura's Single Station Method. M. Sc. Thesis, Institute of Solid Earth Physics, University of Bergen, Norway.
- Teves-Costa, P., Almeida, I. M. & Silva, P. L. (2001). Microzonation of Lisbon: 1D theoretical approach, *Pure Appl. Geophys.* 158, 2579–2596.
- Uyanık, O., Öncü, Z., Uyanık, N. A., & Ekin, N. (2024). Seismic microzonation and geotechnical modeling studies considering local site effects for İnegöl Plain (Bursa-Turkey). *Earth and Space Science*, 11, e2023EA003460. <https://doi.org/10.1029/2023EA003460>
- Yamazaki F., & Ansary, M. A. (1997). Horizontal-to-vertical spectrum ratio of earthquake ground motion for site characterization. *Earthq. Eng. and Struc. Dyn.*, 26, 671-689.



Wood anatomy of *Dalbergia retusa* (Fabaceae: Papilionoideae) and two similar, unidentified wood samples in Panama

Anatomía de la madera de *Dalbergia retusa* (Fabaceae: Papilionoideae) y dos muestras de maderas semejantes indeterminadas en Panamá

Janitce A. Harwood

Universidad de Panamá, Facultad de Ciencias Naturales Exactas y Tecnología, Panamá.
harwoodjanitce@gmail.com <https://orcid.org/0000-0001-5411-049X>

Cristina Garibaldi

Universidad de Panamá, Facultad de Ciencias Naturales Exactas y Tecnología, Panamá
cristina.garibaldi@up.ac.pa <https://orcid.org/0009-0004-0991-0761>

Fecha de recepción: 1 de abril de 2025

Fecha de aceptación: 26 de mayo de 2025

DOI: <https://doi.org/10.48204/j.tecno.v27n2.a7677>

ABSTRACT

We aimed to characterize the anatomical features of *Dalbergia retusa* and clarify the identity of two wood samples labeled “cocobolo” from East Panama. Each wood sample was morpho-anatomically described, measured, and compared following the International Association of Wood Anatomists (IAWA) Committee standards. Basic density and fluorescence tests were also conducted. The wood anatomy of both samples aligns with the typical characteristics of the order Fabales and the genus *Dalbergia*. The combination of these features: vessel frequency, vessel element length, axial parenchyma, fibers and wood density reveals significant structural and functional differences among the three tree samples, which are typically associated with distinct ecological environments. Fluorescence tests did not reveal distinct differences between the samples; however, the density measurements provided useful separation. *D. retusa* exhibited very *high*-density values, while sample 1 showed high-density, and sample 2 showed medium density, both of which suggest variability in the wood properties. The observed anatomical and density differences indicate that the two “cocobolo” samples might represent a distinct taxon, separate from *Dalbergia retusa*.

KEYWORDS

Cocobolo; Darién; legumes; morpho-anatomy; rosewood.

RESUMEN

Nuestro objetivo fue caracterizar los caracteres anatómicos de la madera de *Dalbergia retusa* y aclarar la identidad de dos muestras de madera denominadas como “cocobolo” provenientes de Panamá Este. Cada una de estas tres maderas fueron descritas morfoanatómicamente, medidas y comparadas siguiendo los estándares de la Asociación Internacional de Anatomistas de madera (IAWA). También se realizaron pruebas básicas de densidad y fluorescencia. La anatomía de las dos muestras coincide con las características típicas del orden Fabales y el género *Dalbergia*. La combinación de las características observadas: frecuencia de vasos, longitud de elementos del vaso, parénquima axial, fibras y densidad de la madera reveló diferencias estructurales y funcionales significativas entre las tres muestras, las cual están típicamente asociadas a entornos ecológicos distintos. Las pruebas de fluorescencia no revelaron diferencias distintivas entre las muestras; sin embargo, los valores de densidad proporcionaron una separación útil. *D. retusa* exhibió valores de muy alta densidad, mientras que la muestra 1 mostró alta densidad y en la muestra 2 valores de densidad media, los cuales sugieren variabilidad en las propiedades de la madera. Las diferencias anatómicas y de densidad indican que las dos muestras de “cocobolo” podría representar un taxón distinto a *Dalbergia retusa*.

PALABRAS CLAVE

Cocobolo; Darién; leguminosa; morfo-anatomía; palo de rosa.

INTRODUCTION

Species of the genus *Dalbergia* L. f., a group commonly known as "rosewood," have kept attention, maintained interest, and preference in the global wood market for their excellent physical and mechanical properties (Record & Garrat 1923; Richter *et al.* 1996). There are currently 250 species of *Dalbergia* known to exist (Vatanparast 2013). These species are found in the tropics around the world; the majority are concentrated in Africa, Madagascar, South Asia, and Central and South America (Mabberley 1987; The WFO 2023; Vatanparast 2013). In Mesoamerica, approximately 40 species of the genus *Dalbergia* are reported, and seven of them are found in Panama; only three of these are arboreal: *D. cuscatlanica* (Standl.) Standl., *D. retusa* Hemsl., and *D. tilarana* N. Zamora (Linnaeus 1781; Standley & Record 1936; Dwyer & Hermann 1965; Croat 1978; Correa *et al.* 2004; Hammel *et al.* 2010; Linares & Sousa 2007; Parker 2008).

The wood of *Dalbergia retusa* Hemsl. (cocobolo) has a high commercial value in Panama; it has been prohibited from extraction since 2014, and it has been included in Appendix II of the Convention of International Trade in Endangered Species (CITES) of Wild Fauna and Flora, which regulates trade (CITES 2010; Gasson *et al.* 2011; CITES 2016, Vardeman & Velásquez 2020). *Dalbergia retusa* Hemsl. is one of the most prized species in Asia and the United States for its dark, hard, heavy, veined, beautiful, and resistant wood (Wilmé *et al.* 2009a; Testa 2018).

A family sought to engage in this venture since rosewoods are popular tonewoods for making musical instruments. However, local ecological authorities found that the timbers they wanted to export belonged to *D. retusa*, so exporting them was prohibited. Despite the fact that the morphological and organoleptic traits, including pigmentation, differed greatly from those of *D. retusa*. In order to properly describe and compare their anatomy with *D. retusa* wood, as various authors have done (Richter *et al.* 1996; Miller & Wiemann 2006; Gasson *et al.* 2010; Wiemann & Ruffinatto 2012; Ravaomanalina *et al.* 2017), two samples of wood that were simply identified as “cocobolo” were sent to the Laboratorio de Ecología y Maderas Tropicales del Instituto de Ciencias Ambientales y Biodiversidad of the Universidad de Panamá (LABICAB-UP) so their anatomy could be properly described and compared with *D. retusa* wood in 20016.

Studies by Record & Garat (1923), Kirbs (1968), Richter & Dallwitz (2000), and Moya *et al.* (2013) have provided anatomical descriptions of *D. retusa*. In addition, there are morpho-anatomical descriptions of the order Fabales (Baas *et al.* 2000; Gasson *et al.* 2010), the subfamily Papilionoideae (Espinoza & León 2002), and the genus *Dalbergia* (Richter *et al.* 1996; Espinoza *et al.* 2015, Ravaomanalina *et al.* 2017).

Wood identification techniques are adequate to identify a wood sample to the genus level; however, there are non-anatomical techniques to accurately identify samples. Biological and ecological aspects of species within the *Dalbergia* genus are still unknown. Some species are only known from herbarium specimens, nor have there been anatomical descriptions of the wood of all the species of the genus in America or genetic analyses that help to separate them all. In Panama, this is the situation with *D. cuscatlanica* and *D. tilarana*. Non-anatomical techniques, such as chemotaxonomy (Yin *et al.* 2018), phytochemistry (Kite *et al.* 2010, Gutiérrez & Baez 2013, Saha *et al.* 2013), physiochemical properties (Richter *et al.* 1996, Wiemann & Ruffinatto 2012), and DNA barcoding (Hartvig *et al.* 2015, Yu *et al.* 2017, He *et al.* 2018), have been used to identify or separate species of the genus *Dalbergia*.

This research was developed to describe the anatomical characteristics, determine the density, and validate the fluorescence in the wood of *D. retusa* and the two samples, which we referred to as sample 1 and sample 2. We aimed to distinguish between them and ascertain how closely they matched the anatomical description of *D. retusa*.

MATERIALS AND METHODS

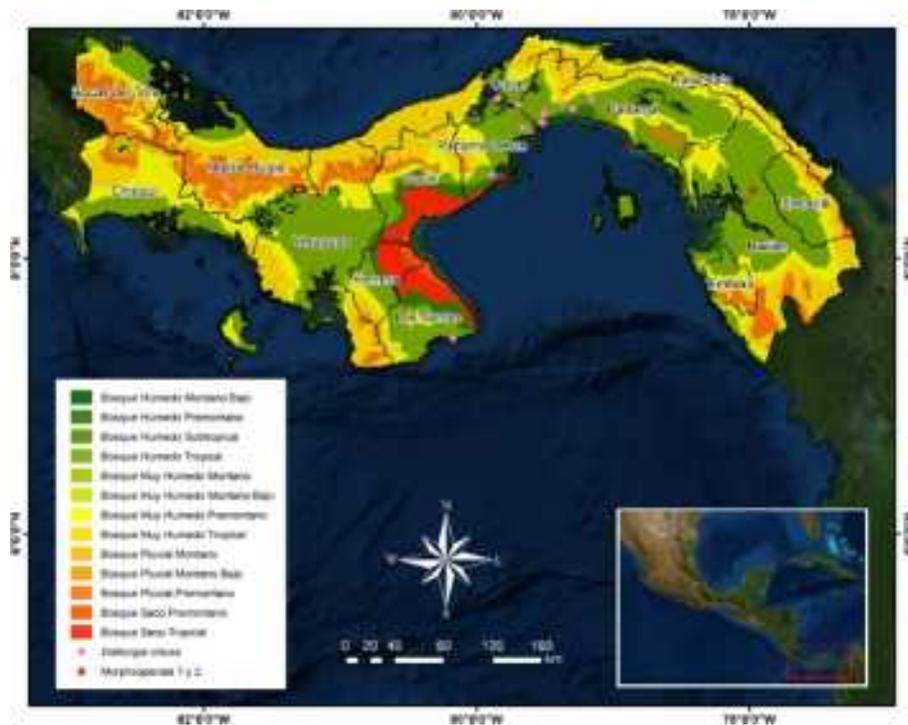
Study site and samples

We only compared these two samples called “cocobolo” with the wood anatomy of *D. retusa*, according to the family’s request and the fact that working with other species in the genus is not feasible. To describe the anatomy of *D. retusa* wood, a previously identified sample

belonging to the xylotheque collection of LABICAB-UP was used. It came from the humid tropical forest of the province of Darién. The two samples called “cocobolo” came from the East region, in Tortí, Panama province, Republic of Panama (Fig. 1). We called the two samples sample 1 and sample sample 2. Sample 1 came from a 5 x 4-inch board, and sample 2 came from a 10 x 3-inch branch of the tree.

Figure 1.

Political and forest map of Panama showing the occurrences of Dalbergia retusa trees based on PMA Herbarium data. Sites where the samples 1 and 2 were collected.



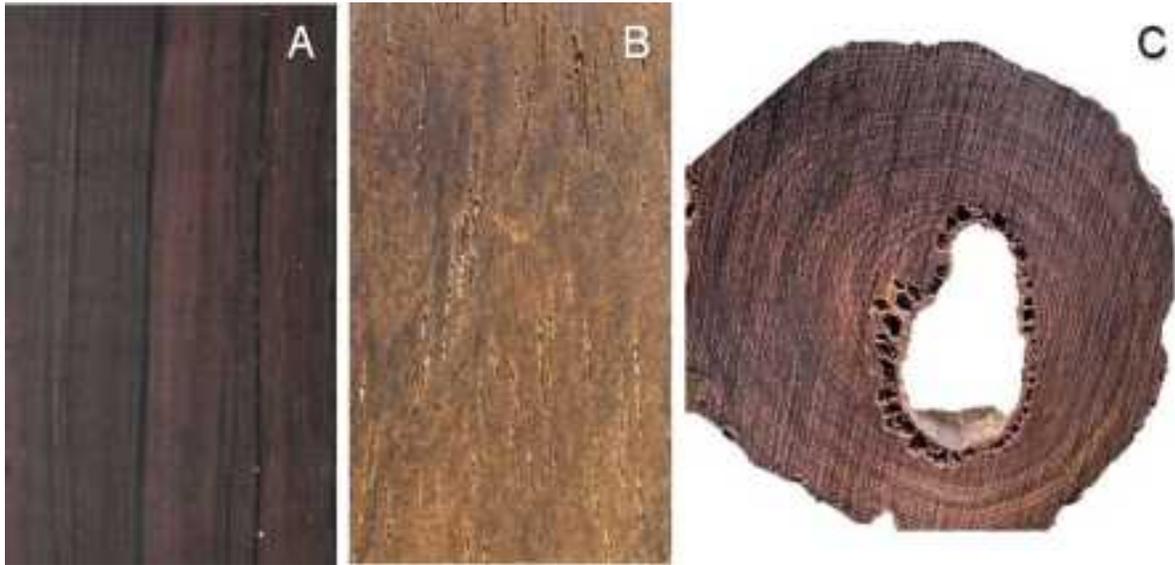
Wood preparation and anatomical descriptions

The samples of the main trunk of *D. retusa*, sample 1, and the branch of sample 2 were softened until it was possible to cut them manually, cut into thin sections (18-30 μm), and stained with 1% aqueous safranin and alcoholic aniline blue as counterstain following the sample preparation and techniques for light microscopy of Tardif & Conciatori (2015) (Fig. 2). The maceration of cells was prepared using Jeffrey's technique (Jeffrey 1917). The samples were described and measured according to the guidelines of the International Association of Wood Anatomists List of Features for Hardwood Identification (IAWA) (IAWA Committee 1989; Wheeler 1986). Image J was used to perform the measurements of these features (Rasband 2011). General and macroscopic characteristics were determined

according to the criteria of the Pan American Commission for Technical Standards (COPANT), the Standards and Procedures in Wood Anatomy Studies (IBAMA), and the American Society for Materials Testing (ASTM) (COPANT 1973; ASTM 1969; IBAMA 1992). Wood color grading was described using the Munsell (2000) color chart. The comparison of the samples was made with descriptions and images available in the InsideWood database InsideWood (2004); Wheeler (2011) and Richter & Dallwitz (2000). Photographs were taken with a Leica EZ4 D stereo microscope. Microscopic features and fluorescence were photographed with a Nikon DS-Ri1 camera and Nikon Eclipse E 600 light microscope, Zeiss Evo 40 scanning microscope (SEM) on uncoated samples and Olympus FLUOVIEW FV 1000 fluorescence microscopes and Olympus FLUOVIEW FV3000, respectively. The specimens and anatomical slides remain in the LABICAB-UP collection. Replicas were not used.

Figure 2.

Figures and coloring of each analyzed sample. A) D. retusa. B) Sample 1. C) Sample 2.



Density measurement

Cubes of 2 cm³ were cut to determine the density of all three samples. To estimate the density [$\rho=m/V$] of all three samples (g/cm³), the water displacement method, in which one gram of displaced water is equivalent to one cubic centimeter volume following the indications of Heinrichs & Lanssen (1970) and Chave (2006).

RESULTS

Diagnosis of *Dalbergia retusa*

General characteristics

In dry conditions, the heartwood of *Dalbergia retusa* is reddish to dark reddish (2.5YR 5/6) with very dark, almost black veins (2.5YR 2.5/1). The sapwood is yellow (10YR 6/6). Abrupt transition. Wood with medium texture, with a distinctive sweet and aromatic aroma, a medium glow, and cross-grained. The wood is very hard and heavy (Table 1).

Macroscopic features

Vessels are visible to the naked eye. Rays and axial parenchyma are visible with a 10x magnifying glass.

Microscopic features

GROWTH RINGS: Indistinct formation of growth rings delimited by condensed fibers with walls with reduced diameter is accompanied by axial parenchyma in marginal bands (Fig. 3A).

VESSELS: Diffuse porosity. Vessels irregularly arranged. Vessels are solitary (66.66%) and in radial multiples of 2 to 4. The vessel outline is rounded. Simple perforation plates were found (Figure 3A, D). Mean tangential diameter of vessels lumina varied from 84.73 to 214.22 μm with an average of $160.87 \mu\text{m} \pm 32.68 \mu\text{m}$ (Table 2, 6). Vessels per square millimeter varied from 1 to 4 vessels/ mm^2 with an average of 1.8 vessels/ mm^2 (Table 2, 6). Mean vessel element length varied from 132.21 to 296.82 μm with an average of $237.43 \mu\text{m} \pm 36.59 \mu\text{m}$, so they are classified as small. Gum deposits were found (Fig. 3A). Vessel elements are storied (Fig. 3D).

INTERVESSEL PITS: Intervessel pits are alternate, circular to polygonal, and ornamented (Fig. 3 E). They are of medium diameter and range between 5.27 to 10.7 μm with an average of $7.93 \mu\text{m} \pm 1.48 \mu\text{m}$ (Table 2, 6). Radiovascular pits are similar to intervessel pits in shape and size.

FIBERS: Nonseptate libriform fibers present. Fibers with simple to small bordered pits. Fiber walls are thick to very thick; wall thickness varied from 3.37 to 9.60 μm and an average of $6.02 \mu\text{m} \pm 1.57 \mu\text{m}$ (Table 3, 6). Fiber lumen varied from 3.22 to 18.90 μm with an average of $8.74 \mu\text{m} \pm 3.46 \mu\text{m}$ (Table 3, 6). Fiber length varied from 795.91 to 1,544.084 μm with an average of $1,159.69 \mu\text{m} \pm 143.46 \mu\text{m}$ (Table 3, 6). Fibers are storied (Fig. 3D).

AXIAL PARENCHYMA: Apotracheal axial parenchyma diffuse and diffuse in aggregates. Paratracheal axial parenchyma vasicentric. Banded axial parenchyma in marginal bands up to three cells wide (Fig. 3A, Table 4). Axial parenchyma cells per strand are mostly 2 fusiform cells (Fig. 3D). Axial parenchyma is storied (Fig. 3D, Table 4).

RAYS: Width up to 3 cells wide, predominantly uniseriate (Fig. 3D). Rays height less than 1 mm, it varied from 0.108 mm to 0.161 mm with an average of 0.135 mm, ± 0.014 mm, so they are classified as short or small (Table 5, 6). Rays composed of procumbent cells and procumbent cells with one row of upright and/or square marginal cells. It presents many rays per millimeter; the frequency varied from 17 to 20 rays/mm, with an average of 18.3 rays/mm ± 1.06 rays/mm (Tables 5, 6). Rays are storied (Fig. 3D).

MINERAL INCLUSIONS: Prismatic crystals positioned in chambered axial parenchyma cells (Fig. 3I).

All quantitative values in table 6.

Table 1.

Macroscopic characteristics of Dalbergia retusa and the samples 1 and 2.

Woods	Colour	Odour and taste	Luster	Grain	Texture	Weight and hardness
<i>D. retusa</i>	Dark reddish heartwood (2.5 YR 5/6). Abrupt transition.	Present	Medium	Crossed	Medium	Hard and heavy
Sample 1	Light reddish to chocolate heartwood (2.5 YR 6/4). No transition.	Absent	Medium	Crossed	Medium	Soft and light
Sample 2	Reddish chocolate heartwood (10 YR 5/6). No transition.	Absent	Medium	Crossed	Medium	Moderately hard and heavy

Table 2.*Vessels element characteristics of Dalbergia retusa and the samples 1 and 2.*

Woods	Growth rings	Porosity	PF	VG	DVL	PP	IPAS	VP	VRP
<i>D. retusa</i>	D, I	Diffuse porous	1.8	2-4	160.87	S	A; 7.93	+	30
Sample 1	D, I	Diffuse porous	4.9	2-3	194.23	S	A; 4.46	+	30
Sample 2	D, I	Diffuse porous	5.2	2-3	150.66	S	A; 5.71	+	30

Vessel elements characteristics: D= distinct, I= indistinct, PF= pores frequency (vessels/mm²), VG= vessel grouping, DVL= diameter of vessel lumina (μm), PP= perforation plates, S= simple, IPAS= intervessel pits arrangement and size (μm), A= alternate, VP= vested pits, VRP= vessel-ray pitting according to IAWA class: 30: vessel-ray pits with distinct borders; similar to intervessel pits in size and shape throughout the ray cell. Symbol “+” anatomical feature present.

Table 3.*Fibers features of Dalbergia retusa and the samples 1 and 2.*

Woods	GTF	SF	FWT	FL	FLD	FS	SG
<i>D. retusa</i>	61	-	6.02	1,159.69	8.74	+	0.76-(VH)
Sample 1	61	-	3.95	1,439.75	10.56	+	0.59-(M)
Sample 2	61	-	3.98	1,100.45	9.41	+	0.71-(H)

Fibers: GTF= ground tissue fibers, according to IAWA class: 61: simple to minutely bordered pits, SF= septate fibers, FWT= fiber wall thickness (μm), FL= fiber lengths (μm), FLD= fiber lumen diameter (μm), FS= fibers storied, SG= specific gravity (g/cm³), VH= very high, H=high, M= medium. Symbol “+” anatomical feature present, “-“anatomical feature absent.

Table 4.*Axial parenchyma features of Dalbergia retusa and the samples 1 and 2.*

Woods	AAP	PAP	BP	CT	APSL	APS
<i>D. retusa</i>	76; 77	79	89	F	1-2	+
Sample 1	76; 77	79; 80	89	F	1-2	+
Sample 2	76; 77	79; 82	89	F	1-2	+

Axial parenchyma: AAP= apotracheal axial parenchyma, according to IAWA class: 76: diffuse, 77: diffuse-in aggregaets. PAP= paratracheal axial parenchyma, according to IAWA class: 79: vasicentric, 80: aliform, 82: winged-aliform. BP= banded parenchyma, according to IAWA class: 89: axial parenchyma in marginal or in seemingly marginal bands. CT= cell type, F= fusiform, APSL= axial parenchyma strand length, APS: axial parenchyma storied. Symbol “+” anatomical feature present.

Table 5.*Rays features of Dalbergia retusa and the samples 1 and 2.*

Woods	RH	RW	RF	RS	RT	RCC
<i>D. retusa</i>	0.135	1-3 (U)	18.3	+	Ho - Ht	104, 106
Sample 1	0.122	1-3 (B)	12.3	+	Ho - Ht	104, 106, 107
Sample 2	0.148	1-3 (A)	10.9	+	Ho - Ht	104, 106, 107

Ray parenchyma: RH= ray height (mm), RW=ray width cell, U: mainly uniseriate, B: mainly biseriate, A: alternates uniseriate and biseriate, RF= ray frequency (ray/mm), RS= ray storied, RT= ray type, Ht= heterocellular, Ho= homocellular, RCC= rays cellular composition, according to IAWA class: 104: all ray cells procumbent; 106: body ray cells procumbent with one row of upright and/ or square marginal cells; 107: body ray cells procumbent with mostly 2-4 rows of upright and/ or square marginal cells. Symbol “+” anatomical feature present.

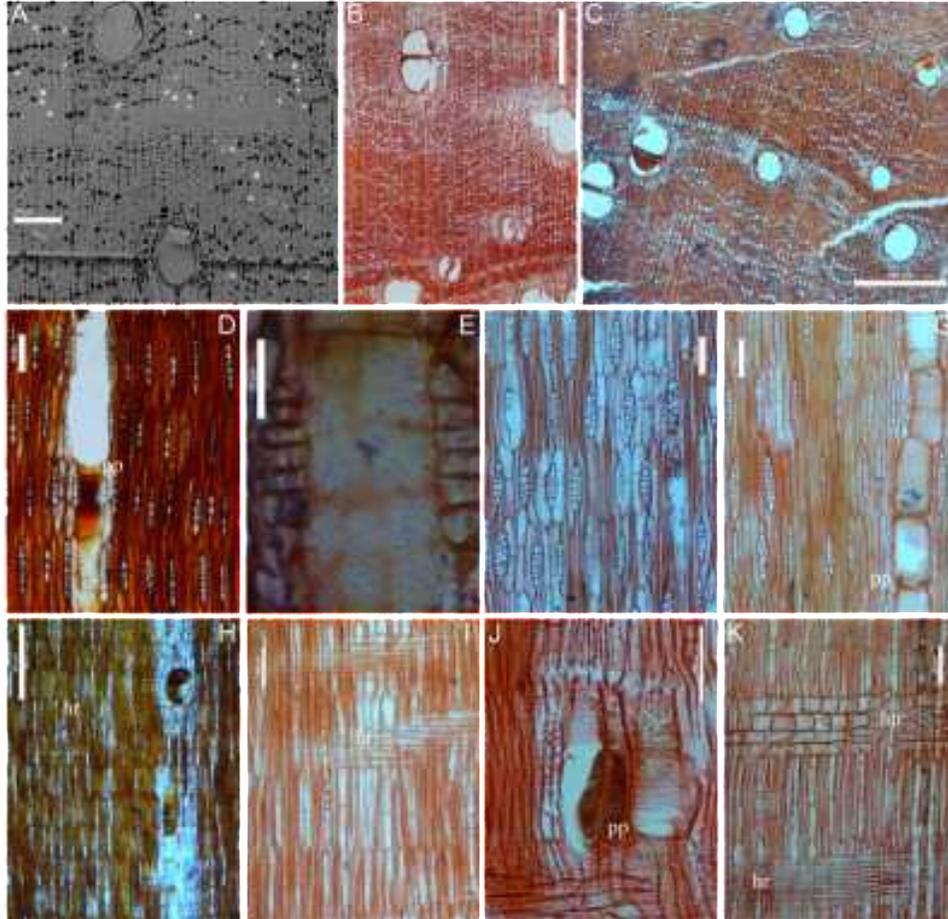
Table 6.

Quantitative values of Dalbergia retusa and the samples 1 and 2. Means are given with standard deviation, maximum and minimum. Note: Freq. frequency, diam. = diameter, Len. = length, WT= wall thickness, SV= percentage of solitary vessels (%), v/mm²= vessels per square millimeter, VEL=vessel element length (μm), DVL tangential diameter of vessel lumina (μm).

Features	Variables /Species	<i>Dalbergia retusa</i> Hemsl.	Sample 1	Sample 2
Vessels	SV (%)	66.7	73.5	57.7
	Freq. (v/mm ²)	1.8 ± 1.03; 1-4	4.9 ± 1.97; 2-8	5.2 ± 2.57; 1-9
	VEL (μm)	237.43 ± 36.59; 132.21-296.82	260.91 ± 41.71; 198.31-352.6	239.21 ± 27.7; 184.8-306.96
	DVL (μm)	160.87 ± 32.68; 84.73-214.22	194.23 ± 63.72; 89-319	150.66 ± 42.23; 50-240.03
Pits	Diam. (μm)	7.93 ± 1.48; 5.27-10.7	4.46 ± 1.41; 2.95-8.46	5.71 ± 0.61; 4.22-7-67
	Height (mm)	0.13 ± 0.014; 0.108-0.161	0.12 ± 0.020; 0.074-0.16	0.15 ± 0.013; 0.11-0.17
Rays	Freq. (r/mm)	18.3 ± 1.06; 17-20	12.3 ± 1.77; 9-15	10.9 ± 1.59; 8-14
	Lumen (μm)	8.74 ± 3.46; 3.22-18.9	10.56 ± 5.14; 3.73-23.42	9.41 ± 3.45; 2.47-15.99
Fibers	WT (μm)	6.02 ± 1.57; 3.37-9.6	3.955 ± 0.86; 2.61-6.58	3.98 ± 1.06; 2.5-6.52
	Len. (μm)	1,159.69 ± 143.46; 795.91-1,544.08	1,439.75 ± 310.74; 768.89-2,083.66	1,100.45 ± 291.61; 566.65-1,587.59

Figure 3.

Comparison of anatomical features observed in the studied samples. A, D, E & H. *Dalbergia retusa*. B, F, I & J. Sample 1. C, G & K. Sample 2. Growth ring boundaries distinct (A, B, C). Radial multiples (A, B, C). Simple perforation plate (pp) (D, G, J). Vessels with gums deposits (D, H, J). Vasicentric axial parenchyma (A, B). Winged-aliform axial parenchyma (C). Axial parenchyma in marginal bands (A, B, C). Homocelular rays (hr) (H, I, K). Heterocelular rays (htr) (K). Crystals (I). Scale bar A=200 u; B, C= 500 µm; D, E, F, G, H, I, J, K=100 µm.



Diagnosis of sample 1

General characteristics

In dry conditions, the heartwood of sample 1 is light reddish to chocolate color (2.5YR 6/4). Wood with medium texture, without distinctive aroma, medium shine, and cross-grained. The wood is soft and light (Table 1).

Macroscopic features

Vessels are visible to the naked eye. Axial parenchyma is visible with a 10x magnifying glass. Rays are barely visible with a 10x magnifying glass.

Microscopic features

GROWTH RINGS: Indistinct formation of growth rings delimited by condensed fibers with walls with reduced diameter is accompanied by axial parenchyma in marginal bands (Fig. 3B).

VESSELS: Diffuse porosity. Vessels irregularly arranged. Vessels are solitary (73.5%) and in radial multiples of 2 to 3 (Fig. 3B). The vessel outline is rounded. Simple perforation plates were found (Fig. 3J). Mean tangential diameter of vessel lumina varied from 89 to 319 μm with an average of $194.23 \mu\text{m} \pm 63.72 \mu\text{m}$ (Table 2). Vessels per square millimeter varied from 2 to 8 vessels/ mm^2 with an average of 4.9 vessels/ mm^2 . Mean vessel element length varied from 198.31 to 352.6 μm with an average of $260.91 \mu\text{m} \pm 41.71 \mu\text{m}$, so they are classified as small. Gum deposits were found (Fig. 3J). Vessel elements are storied.

INTERVESSEL PITS: Intervessel pits are alternate, polygonal, and ornamented. They are small to medium in diameter and range between 2.95 to 8.46 μm with an average of 4.46 $\mu\text{m} \pm 1.41 \mu\text{m}$ (Table 2). Radiovascular pits are similar to intervascular pits in shape and size.

FIBERS: Nonseptate libriform fibers present (Fig. 3F). Fibers with simple to small bordered pits. Fibers are thin to thick walled; wall thickness varied from 2.61 to 6.58 μm and an average of $3.95 \mu\text{m} \pm 0.86 \mu\text{m}$. Fibers lumen varied from 3.73 to 23.42 μm with an average of $10.56 \mu\text{m} \pm 5.14 \mu\text{m}$. Fibers length varied from 768.89 to 2,083.66 μm with an average of $1,439.75 \mu\text{m} \pm 310.74 \mu\text{m}$ (Table 2, 4). Fibers are storied (Fig. 3F).

AXIAL PARENCHYMA: Apotracheal axial parenchyma diffuse and diffuse in aggregates (Fig. 3B). Paratracheal axial parenchyma vasicentric and aliform (Fig. 3B). Banded axial parenchyma in marginal bands up to three cells wide (Fig. 3B). The cells of the axial parenchyma are mostly made up of 1 to 2 fusiform cells (Fig. 3F; Table 3). Axial parenchyma is storied (Fig. 3F).

RAYS: Width up to 3 cells, predominantly biseriate and up to 3 cells wide (Fig. 3F). Rays height less than 1 mm, ranging from 0.0744 to 0.162 mm with an average of $0.122 \text{ mm} \pm 0.020 \text{ mm}$, so they are classified as short or small. Rays composed of procumbent cells and procumbent cells with one row of upright and/or square marginal cells. It presents many rays per millimeter; the frequency varied from 9 to 15 rays/mm, with an average of $12.3 \text{ rays/mm} \pm 1.77 \text{ rays/mm}$ (Tables 2, 4). Rays are storied (Fig. 3F).

MINERAL INCLUSIONS: Prismatic crystals positioned in chambered axial parenchyma cells.

Diagnosis of the sample 2

General characteristics

In dry conditions, the heartwood of sample 2 is reddish (10YR 5/6) with dark veins (10YR2.5/1). No transition was observed. Wood with medium texture, without characteristic aroma, medium shine, and cross-grained. The wood is moderately hard and heavy. The wood sample had insect damage (Table 1).

Macroscopic features

Vessels are visible to the naked eye. Axial parenchyma is visible with a 10x magnifying glass. Thin rows of rays are visible only with a 10x magnifying glass.

Microscopic features

GROWTH RINGS: Indistinct formation of growth rings delimited by condensed fibers with walls with reduced diameter is accompanied by axial parenchyma in marginal bands (Fig. 3C).

VESSELS: Diffuse porosity. Vessels irregularly arranged. Vessels are solitary (57.69%) and in radial multiples of 2 to 3 (Fig. 3C). The vessel outline is rounded. Simple perforation plates were found (Fig. 3G). Mean tangential diameter of vessel lumina varied from 50 to 240.03 μm with an average of $150.66 \mu\text{m} \pm 42.23 \mu\text{m}$. Vessels per square millimeter varied from 1 to 9 vessels/ mm^2 with an average of 5.2 vessels/ mm^2 . Mean vessel element length varied from 184.8 to 306.96 μm with an average of $239.21 \mu\text{m} \pm 27.7 \mu\text{m}$, so they are classified as small. Gum deposits were found (Table 1, 4). Vessel elements are storied (Fig. 3G).

INTERVESSEL PITS: Intervessel pits are alternate, polygonal, and ornamented. They are small in diameter and range between 4.22 to 7.67 μm with an average of $5.71 \mu\text{m} \pm 0.61 \mu\text{m}$. Radiovascular pits are similar to intervascular pits in shape and size (Table 1, 4).

FIBERS: Nonseptate libriform fibers present. Fibers with simple to small bordered pits (Fig. 3K). Fibers thin to thick wall; wall thickness varied from 2.50 to 6.52 μm and an average of $3.98 \mu\text{m} \pm 1.06 \mu\text{m}$. fiber's lumen varied from 2.47 to 15.99 μm with an average of $9.41 \mu\text{m} \pm 3.45 \mu\text{m}$. Fiber length varied from 566.65 to 1,587.59 μm with an average of $1,100.45 \mu\text{m} \pm 291.61 \mu\text{m}$ (Table 2, 4). Fibers are storied (Fig. 3G).

AXIAL PARENCHYMA: Apotracheal axial parenchyma is diffuse and diffuse in aggregates (Fig. 3C). Paratracheal axial parenchyma vasicentric and winged-aliform (Fig. 3C). Banded

axial parenchyma in marginal or apparently marginal bands up to three cells wide (Fig. 3C). The axial parenchyma cells are made up of 1 to 2 fusiform cells (Fig. 3G; Table 3).

RAYS: Width up to 3 cells, predominantly biseriate and alternating with uniseriate rays (Fig. 3G). Rays height less than 1 mm, ranging from 0.113 to 0.177 mm with an average of 0.148 mm \pm 0.013 mm, so they are classified as short or small. Rays composed of procumbent and procumbent with mostly 2-4 rows of upright and/or square marginal cells (Fig. 3K). It presents few rays per millimeter; the frequency is 8 to 14 rays/mm with an average of 10.9 rays/mm \pm 1.59 rays/ mm (Tables 2, 4). Rays are storied (Fig. 3G).

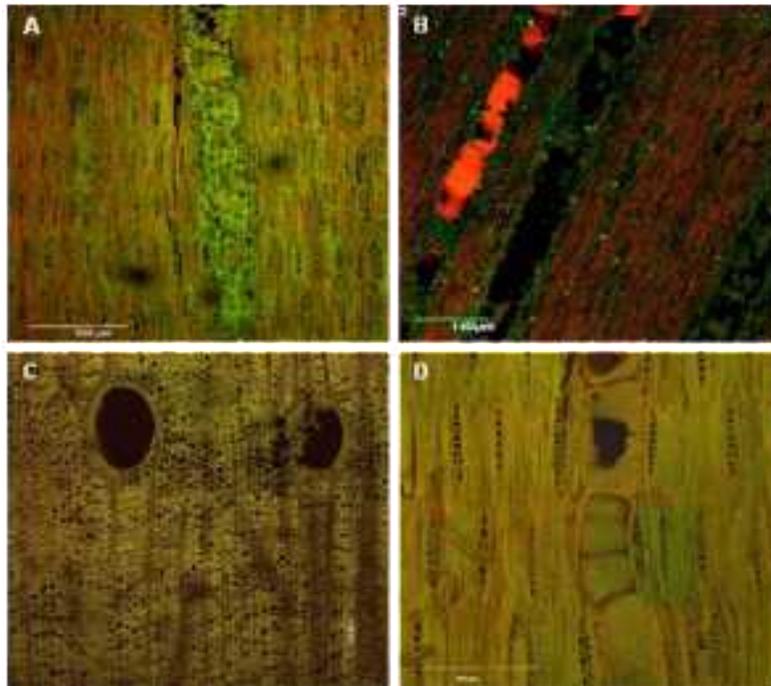
MINERAL INCLUSIONS: Prismatic crystals positioned in chambered axial parenchyma cells.

Fluorescence test

All three samples showed fluorescence. *D. retusa* wood and sample 1 presented the colors: red and green. The wood of sample 2 presented the following colors: red and a weak green and yellow color (Fig. 4).

Figure 4.

Comparison of anatomical features observed in the samples studied. A-B. D. retusa. B-C. Sample 1 and 2.



Samples basic density

The basic density of *D. retusa* wood, the sample 1 and the sample 2 was 0.76 g/cm³ (very high), 0.59 g/cm³ (high), and 0.71 g/cm³ (median), respectively.

DISCUSSION

General, qualitative, and quantitative features of *Dalbergia retusa* observed matched the descriptions of Record & Garrat (1923), Gottald (1958), Kribs (1968), Richter *et al.* (1996), Richter & Dallwitz (2000), Wiedenhoeft (2011), and Moya *et al.* (2013). The paratracheal axial parenchyma observed is vasicentric but not scarce as reported by Moya *et al.* (2013) and Record & Garrat (1923). Axial parenchyma strands are mainly composed of 2 cells or scarcely 4 cells, as described by Kribs (1968), Richter & Dallwitz (2000), and Moya *et al.* (2013); and it does not present or is weakly confluent and cross-linked as Kribs (1968) described.

According to Record (1919, 1942), Record & Garrat (1923), Jane (1956), Carlquist (1966, 2001), Kribs (1968), Quirk & Miller (1985), Richter *et al.* (1996), Baas *et al.* (2000), Espinoza & León (2002), Gasson *et al.* (2010), Espinoza *et al.* (2015), and Ravaomanalina *et al.* (2017), the qualitative anatomical characteristics of samples 1 and 2 show diagnostic features consistent with the Fabaceae family and the *Dalbergia* genus. Both samples' voucher specimens have been deposited in the PMA herbarium. There are fruits and leaves in one sample and just leaves in the other. This made it possible for us to verify that both samples are from *Dalbergia* trees, which match the morphology described in the Flora of Panama (Dwyer & Hermann 1965). A specialist also examined the fruits of sample 2 and, as expected, found significant differences compared to *Dalbergia retusa*.

While samples 1 and 2 show a higher vessel density, *D. retusa* has fewer and smaller vessels per square millimeter. Samples 1 and 2 exhibit 2 to 3 vessel multiples, whereas *D. retusa* develops vessel multiples of 2 to 4. There is very little difference in the average vessel element length between *D. retusa* and the two samples; sample 1 has the longest average length. Furthermore, compared to samples 1 and 2, the vessels of *D. retusa* are shorter.

The paratracheal axial parenchyma type in *D. retusa* is more limited in range. Such differences in axial parenchyma types influence water storage and flow; species with different axial parenchyma types may occupy distinct ecological niches (Carlquist 2001). According to Carlquist (2001), vessel frequency is frequently higher in trees from wet tropical forests where quick water conduction is essential, as seen in the forests where samples 1 and 2 were collected. In contrast, species from dry or seasonal forests, such as *D. retusa*, tend to have lower vessel frequencies, which helps prevent cavitation and water loss during droughts, minimizing the risk of water loss and cavitation (Carlquist 2001; Hacke *et*

al. 2006; Martínez-Cabrera *et al.* 2009). Demonstrating functional and structural differences. Additionally, the correlation between vessel element length and water availability supports species differentiation in response to ecological conditions and their efficiency in water conduction (Hacke *et al.* 2006). The rays in *D. retusa* are predominantly uniseriate, while the rays in sample 1 are mostly biseriate rays, and sample 2 primarily features biseriate rays, alternating with uniseriate rays.

The walls of the fibers of *D. retusa* are medium to very thick; while those of sample 2 are thin to thick, therefore, the lumen of the fibers of sample 2 is larger than that of the fibers of *D. retusa*. According to Martínez-Cabrera *et al.* (2009), while the proportion of the fiber wall slightly declines in areas with higher rainfall, like those found in the region of origin of samples 1 and 2, which is 2,000 to +2,500 mm/year, the proportion of fiber lumen is inversely correlated with temperature and positively correlated with precipitation (Instituto Nacional de Estadística y Censo 2010). Since *D. retusa* thrives in deciduous forests with drought and nutrient stress, its fiber' walls are thick (Martin 1984; Hall & Ashton 2016).

D. retusa exhibited very high density values, high density values for sample 1, and medium density values for sample 2. This character can vary due to environmental elements like temperature and precipitation (Barajas-Morales 1987; Wiemann & Williamson 2002; Swenson & Enquist 2007; Martínez-Cabrera *et al.* 2009). Wood density seems to differ significantly among coexisting species despite this broad climate-related pattern (Wiemann & Williamson 2002; Muller-Landau 2004). Plumptre (1984) claims that trees that grow at low altitudes and latitudes, with a high humidity deficit or in climates with a distinct dry season, tend to have higher wood densities due to the presence of fewer vessels and thicker walls, an adaptation that lowers water loss and increases structural support, as in the case of *D. retusa*. However, Martínez-Cabrera *et al.* (2009) and Ziemińska *et al.* (2015) noted that density is lowest when there is a substantial amount of parenchyma or a high proportion of lumen in fibers, as seen in samples 1 and 2. These features can help differentiate species based on their ecological adaptations, influencing their survival strategies in various forest types and climates.

CONCLUSIONS

This research aims to increase awareness and safeguard native *Dalbergia* species populations. The combination of vessel frequency, vessel element length, axial parenchyma, fibers, and wood density reveals significant structural and functional differences between the three samples. These differences are usually linked to different ecological environments. Numerous tree species that are significant from an ecological and economic standpoint are found in the genus *Dalbergia*. It is possible to trace both legal and illicit logging of *Dalbergia* species, manage conservation efforts, and create laws that guarantee sustainable harvesting by knowing and distinguishing the wood anatomy of these species.

Mi Ambiente must establish a forensic botany department responsible for researching and expanding this field of study nationwide in order to aid in the preservation of *Dalbergia* species and deter the illicit trade in endangered species. Effective conservation measures may be hampered by misidentification or a failure to distinguish between species, which may mask significant ecological significance. Numerous economically important timber species can be found in Panama, although their full potential is yet mostly unknown. There are many opportunities to learn about ecological processes, forecast how species may respond to climate change, find underappreciated species that might be suitable for high-value markets, and support ecological sustainability.

Furthermore, this research could be applied to botanical studies of families like Rubiaceae and Melastomataceae, as these families encompass a large number of woody species under several genera. Creating detailed wood anatomical descriptions could help unlock their potential for both economic and ecological uses.

Although the evidence is not enough to guarantee that samples 1 and 2 are different taxa, the results obtained suggest that this could be the case. It is possible that, with phytochemical, physicochemical, phylogenetic, and chromatographic analyses, together with the comparison of the botanical material of both samples of the genus *Dalbergia*, these can be separated as taxa different from the species *Dalbergia retusa*. Determining whether these samples are *D. tucurensis*, which has been reported in Belize, Costa Rica, El Salvador, Guatemala, Honduras, México, and Nicaragua (Tropicos 2025a), and is moderately hard and heavy, with a violet to chocolate color when dry, or *D. stevensonii*, which has been reported in Belize, Guatemala, Honduras, and Mexico (Tropicos 2025b), which is heavier than the previous one and pink in color, some species have already been reported in Panama and Costa Rica, or whether the samples may be new species for science.

It is extremely important from a taxonomic standpoint to have anatomical descriptions of commercially valuable woods, their physical and chemical characteristics, and information about the species' origin and distribution in Panamanian territory.

ACKNOWLEDGMENTS

We thank LABICAB-UP for allowing the use of the wood collection and the samples provided. The first author is grateful to the internship program of the Smithsonian tropical Research Institute (STRI) and Secretaría Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación (SENACYT) in Panama, as well as William Wcislo for granting permission to use their facilities and Jorge Ceballos for assistance with SEM photos. Brett T. Wolfe for his insightful remarks and recommendations. Irving Arcia, Joana Sumich, Yoneidi Saldaña, Orlando Ortiz,

Ernesto Campos for their help and advice during the project's development. General funds from STRI to WW and the STRI-SENACYT internship helped support this research.

BIBLIOGRAPHIC REFERENCES

ASTM (American Society for Testing and Materials). (1969). Standard method for testing small clear specimens of timber. 126 p. (Designation D 143-52).

Baas, P., Wheeler, E., & Chase, M. (2000). Dicotyledonous wood anatomy and the APG system of angiosperm classification. *Bot. J. Linn. Soc.* 134(1-2): 3-17. [10.1111/j.1095-8339.2000.tb02343.x](https://doi.org/10.1111/j.1095-8339.2000.tb02343.x)

Barajas-Morales, J. (1987). Wood specific gravity in species from two tropical forests in Mexico. *IAWA Bulletin* 8(2): 143–148.

Carlquist, S. (2001). Comparative wood anatomy: systematic, ecological, and evolutionary aspects of dicotyledon wood. 2 ed. Heidelberg, Germany. Springer. 435 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-04578-7>

Carlquist, S. (1966). Wood anatomy of Compositae: a summary, with comments on factors controlling wood evolution. *Aliso*, 6(2): 25-44.

Chave, J. (2006). Medición de densidad de madera en árboles tropicales. Manual de campo. Toulouse, France. Pan-Amazonia. 7 p.

Convention on International Trade in Endangered Species of Wild Fauna and Flora (CITES). (2010). *Cedrela, D., retusa, D., granadillo, & D. stevensonii*. Doha, Qatar. <https://cites.org/sites/default/files/eng/cop/15/doc/E15-57.pdf>

Convention on International Trade in Endangered Species of Wild Fauna and Flora (CITES). (2016). The Checklist of CITES Species Website. Appendices I, II and III valid from 04 April 2017. Geneva, Switzerland. Cambridge, England. <https://www.cites.org/eng/app/appendices.php>

COPANIT (Comisión Panamericana de Normas Técnica). (1973). Descripción macroscópica, microscópica y general de la madera. p 1-19. (Esquema 1).

Correa, M. D., Galdames, C., & Stapf, M. S. (2004). Catálogo de las plantas vasculares de Panamá. Universidad de Panamá, Editora Novo Art. 599 p.

Croat, T. B. (1978). Flora of Barro Colorado Island. Stanford University Press. 337 p.

- Stevensonii Satandl, D.. (2025a). *Tropicos.org*. Missouri Botanical Garden. <https://www.tropicos.org/name/13014006>
- D. tucurensis Donn. Sm. (2025b). *Tropicos.org*. Missouri Botanical Garden. <https://www.tropicos.org/name/13014010>
- Dwyer, J. D., Hermann, F. J. (1965). Flora of Panama. Part V, fascicle 4. Family 83. Leguminosae. Subfamily Papilionoideae (in part). *Ann. Mo. Bot. Gard.* 52(1): 1-54.
- Espinoza, E. O., Wiemann, M. C., Barajas-Morales, J. G. Chavarria, D., & McClure, P. J. (2015). Forensic analysis of CITES-protected *Dalbergia* timber from the Americas. *Iawa J.*, 36(3): 311-325. 10.1163/22941932-20150102
- Espinoza, N. E., & León, W. J. (2002). Estudio Anatómico del leño de 56 especies. *Rev. Forest. Venezuela*, 46(1): 59-71.
- Gasson P., Baas, P., & Wheeler, E. (2011). Wood anatomy of CITES-listed tree species. *IAWA J.* 32(2): 155-198, <https://doi.org/10.1163/22941932-90000050>
- Gasson P., Miller, R., Stekel, D.J., Whinder, F., & Ziemińska, K. (2010). Wood identification of *Dalbergia nigra* (CITES Appendix I) using quantitative wood anatomy, principal components analysis and naïve Bayes classification. *Ann. Bot.* 105(1): 45-56. <https://doi.org/10.1093/aob/mcp270>
- Gottald, H. (1958). Handelsholzer. Ferdinand Holzman Verlag, Hamburg.
- Gutiérrez RMP, EG Baez. (2013). Citotoxic activity of isoflavan-cinnamylphenols from *Dalbergia congestiflora* on HeLa cells. *J. of Med. Plant Res.* 7(40): 2992-2998. <https://academicjournals.org/journal/JMPR/article-full-text-pdf/BC9B37341433>
- Hacke, U. G., Sperry, J. S., Wheeler, J. K., & Castro, L. (2006). Scaling of angiosperm xylem structure with safety and efficiency. *Tree Physiology*, 26(6): 689-701. <https://doi.org/10.1093/treephys/26.6.689>
- Hall, J. S., & Ashton, M. (2016). Guía de crecimiento y sobrevivencia temprana de 64 especies de árboles nativos de Panamá y el Neotrópico. 1 ed. Panamá, Panamá. Instituto Smithsonian de Investigaciones Tropicales. 171 p.
- Hammel, B. E., Grayum, M. H., Herrera, C., & Zamora, N. (2010). Manual de Plantas de Costa Rica. Volumen V. Dicotiledóneas (Clusiaceae–Gunneraceae). Missouri, Missouri Botanical Garden Press, US: St. Louis. 119:1-970.

- Hartvig I., Czako, M., Kjær, E. D., Nielsen, L. R., & Theilade, I. (2015). The use of DNA barcoding in identification and conservation of rosewood (*Dalbergia* spp.). *PLoS One*, 10(9): e0138231. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0138231>
- He, T., Jiao, L., Yu, M., Guo, J., Jiang, X., & Yin, Y. (2019). DNA barcoding authentication for the wood of eight endangered *Dalbergia* timber species using machine learning approaches. *Holzforschung*, 73(3): 277-285. <https://doi.org/10.1515/hf-2018-0076>
- Heinrichs, J. F., & Lassen, L. E. (1970). Improved technique for determining the volume of irregularly shaped wood blocks. *For. Prod. J.*, 20(4): 24.
- IAWA Committee. (1989). IAWA list of microscopic features for hardwood identification. *IAWA J.*, 10 (3): 219– 332.
- IBAMA (Instituto de Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis). (1992). Normas e procedimentos en estudos de anatomía de madeira: angiospermas e gimnospermas. 17 p. (Serie técnica, 15).
- InsideWood. (2004) Modern hardwood menu. [Accessed: 9 July 2019]. <http://insidewood.lib.ncsu.edu/search>.
- Instituto Nacional de Estadística y Censo. (2010). Precipitación Pluvial Registrada en las Estaciones Meteorológicas de la República, según Provincia, Comarca Indígena y Estación: años 2011-10. In: <https://www.inec.gob.pa/archivos/P3771121-01.pdf>
- Jane, F. W. (1956). The structure of wood. Mcmillan, New York, vii + 427 p.
- Jeffrey, E. C. (1917). The anatomy of woody plants. 1 ed. Chicago, Illinois. University of Chicago Press. 478 p.
- Kite, G. C., Green, P. W., Veitch, N. C., Groves, M. C., Gasson P. E., & Simmonds, M. S. (2010). Dalnigrin, a neoflavonoid marker for the identification of Brazilian rosewood (*Dalbergia nigra*) in CITES enforcement. *Phytochemistry*, 71(10): 1122-1131. <https://doi.org/10.1016/j.phytochem.2010.04.011>
- Kribs, D. A. (1968). Commercial foreign woods on the American market. 1 ed. Verlag, Berlin. Dover Publications. 241 p.
- Linares, J., & Sousa, M. (2007). Nuevas especies de *Dalbergia* (Leguminosae: Papilionoideae: Dalbergieae) en México y Centroamérica. *Ceiba*, 48(1-2): 61-82.

- Linnaeus, C., & von Linné, C. (1781). *Supplementum plantarum Systematis vegetabilium, editionis decimæ tertiæ, Generum plantarum editionis sextæ, et Specierum plantarum editionis secundæ. impensis Orphanotrophei.*
- Mabberley D. J. (1987). *The plant-book.* Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom, 707 p.
- Martin, C. (1984). *Tropical timbers of the world. Agriculture handbook (USA). no. 607.*
- Martínez-Cabrera, H. I., Jones, C. S., Espino, S., & Schenk, H. J. (2009). Wood anatomy and wood density in shrubs: responses to varying aridity along transcontinental transects. *Am. J. Bot.*, 96(8): 1388–1398. <https://doi.org/10.3732/ajb.0800237>
- Miller, R. B., & Wiemann, M. C. (2006). Separation of *Dalbergia nigra* from *Dalbergia spruceana*. *For. Prod. Lab.* 5 p.
- Moya, R., Wiemann, M. C., & Olivares. C. (2013). Identification of endangered or threatened Costa Rican tree species by wood anatomy and fluorescence activity. *Rev. Bio. Tro.*, 61(3): 1113-1156.
- Muller-Landau, H. C. (2004). Interspecific and inter-site variation in wood specific gravity of tropical trees. *Biotrópica*, 36: 20–32.
- Munsell Color. (2000). *Munsell Soil Color Charts.* New Windsor, New York. 10 p.
- Parker, T. (2008). *Trees of Guatemala (No. CG/582.16097281 P3).* 1033 p.
- Plumtre, R. A. (1984). *Pinus caribaea. Volume 2: Wood properties.* 1 ed. Oxford, England. University of Oxford. 148 pp.
- Quirk, J., & Miller. R. (1985). Vestured pits in the tribe Cassieae Bronn (Leguminosae). *IAWA J.*, 6(3):200-212.
- Rasband, W. S. (2011). National Institutes of Health, Bethesda, Maryland, USA. <http://imagej.nih.gov/ij/>.
- Ravaomanalina, B. H., Crivellaro, A., & Schweingruber, F. H. (2017). *Stem Anatomy of Dalbergia and Diospyros Species from Madagascar: With a Special Focus on Wood Identification.* 1 ed. New York, USA. Springer Cham. 119 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-51147-4>

- Record S. (1942). Keys to American woods. I. Ring porous woods. *Trop. Woods*, 72:19-29.
- Record, S. J., & Garratt, G. A. (1923). 'Cocobolo'. Yale University School of Forestry Bulletin, 18(8): 5-43.
- Record, S. J. (1919). Storied or tier-like structure of certain dicotyledonous woods. Bulletin of the Torrey Bot. Club, 46(7):253-273.
- Richter, H. G., & Dallwitz, M. J. (2000). Commercial timbers: descriptions, illustrations, identification, and information retrieval. [Accessed: 9th April 2019]. <https://www.delta-intkey.com/citeswood/es/www/fabdare.htm>
- Richter, H. G., Krause, V. J., & Muche, C. (1996). *Dalbergia congestiflora* Standl.: wood structure and physico-chemical properties compared with other Central American species of *Dalbergia*. *IAWA J.*, 17(3): 327-341.
- Saha, S., Shilpi, J. A., Mondal, H., Hossain, F., Anisuzzman, M., Hasan, M. M., & Cordell, G. A. (2013). Ethnomedicinal, phytochemical, and pharmacological profile of the genus *Dalbergia* L. (Fabaceae). *Phytopharmacology*, 4(2): 291-346.
- Standley, P., Record, S. (1936). Forests and Flora of British Honduras. Field Museum Of Natural History, Chicago, 12(350): 1-432.
- Swenson, N. G., & Enquist, B. J. (2007). Ecological and evolutionary determinants of a key plant functional trait: wood density and its community-wide variation across latitude and elevation. *Am. J. Bot.*, 94(3): 451–459.
- Tardif, J. C., Conciatori, F. (2015). Microscopic examination of wood: sample preparation and techniques for light microscopy. In Plant Microtechniques and Protocols. Yeung ECT, et al. eds. Manitoba, Canada. Springer. p. 373-415. 10.1007/978-3-319-19944-3_22
- Testa, M. (2018). El 32% de la madera que se comercializa en Panamá es ilegal. La Estrella de Panamá, sección Vida y Cultura. In: <http://laestrella.com.pa/vida-de-hoy/planeta/32-madera-comercializa-panama-ilegal/24061780/foto/399119#gallery>. [accessed 20 July 2019].
- Vardeman E., & Velásquez, J. (2020). Panama's illegal rosewood logging boom from *Dalbergia retusa*. GECCO 23: e01098. <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2020.e01098>

- Vatanparast M, Klitgard, B. B., Adema, F. A., Pennington, T., Yahara, T., & Kajita, T. (2013). First molecular phylogeny of the pantropical genus *Dalbergia*: implications for infrageneric circumscription and biogeography. *S. Afr. J. Bot.*, 89: 143-149. <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2013.07.001>
- WFO. The World Flora Online. (2023) <http://www.worldfloraonline.org/search?query=dalbergia&limit=24&start=0&sort=>
- Wheeler, E. A. (2011). InsideWood - a web resource for hardwood anatomy. *IAWA J.*, 32(2): 199–211.
- Wheeler, E. A. (1986). Vessels per square millimeter or vessel groups per square millimeter? *IAWA J.*, 7(1): 73-74.
- Wiedenhoef, A. C. (2011). Identificación de las especies maderables de Centroamérica. For. Prod. Soc. 100 p.
- Wiemann M., & Williamson, G. (2002). Geographic variation in wood specific gravity: effects of latitude, temperature, and precipitation. *Wood Fiber Sci.*, 34(1): 96–107. <https://research.fs.usda.gov/treesearch/15173>
- Wiemann, M. C., & Ruffinatto, F. (2012). Separation of *Dalbergia stevensonii* from *Dalbergia tucurensis*. *Forest Products Laboratory*, 665: 1-9. <https://doi.org/10.2737/FPL-RP-665>
- Wilmé L, Schuurma, D., Lowry, P. P., & Raven, P. H. (2009). Precious trees pay off – but who pays? An update. Document prepared for the COP15, Copenhagen Meeting, 7-15 December 2009.
- Yin, X, Huang, A., Zhang, S., Liu, R., & Ma, F. (2018). Identification of three *Dalbergia* species based on differences in extractive components. *Molecules*, 23(9): 2163. <https://doi.org/10.3390/molecules23092163>
- Yu, M, Jia, L, Guo, J., Wiedenhoef, A. C., He, T., Jiang, X., & Yin, Y. (2017). DNA barcoding of vouchered xylarium wood specimens of nine endangered *Dalbergia* species. *Planta*, 246(6):1165-1176. <https://doi.org/10.1007/s00425-017-2758-9>
- Ziemińska, K, Westoby, M., & Wright, I. J. (2015). Broad anatomical variation within a narrow wood density range – A study of twig wood across 69 Australian angiosperms. *PLoS One*, 10(4): e0124892. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0124892>