



Biología-Química-Física
Matemática-Estadística



TECNOCIENCIA

Volumen 26 No. 1

ISSN L 2415-0940



Revista de la Facultad de Ciencias Naturales, Exactas y Tecnología
Universidad de Panamá
Enero - Junio 2024

TECNOCIENCIA

Volumen 26, No. 1
enero - junio 2024

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/0000-0001-9339-486X>

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

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

Dr. Fernando Gómez Merino

Colegio de Postgraduados, México

fernandg@colpos.mx

Dr. Edgardo Castro

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

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

Dra. Yaxelis Mendoza

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

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

Comité de diagramación, estilo y producción

Dr. Eduardo Camacho Astigarrabia

Universidad de Panamá - Editor Jefe

Michelle Ferrín

Universidad de Panamá - Secretaría

Ing. Samuel Rodríguez, Lic. Rigo - Universidad de Panamá - Técnicos

EDITORIAL

La revista *Tecnociencia* se ha publicado ininterrumpidamente desde el 5 de mayo de 1995, siendo una de las primeras revistas científicas de la Universidad de Panamá. Desde sus inicios, esta revista interdisciplinaria, de la Facultad de Ciencias Naturales, Exactas y Tecnología, ha publicado innumerables artículos en las áreas de su competencia.

En las 14 contribuciones, que presentamos a la comunidad científica y público en general se incluyen investigaciones sobre, parásitos gastrointestinales presentes en dos subespecies del mono aullador en Panamá (*Alouatta coibensis trabeata* y *Alouatta palliata aequatorialis*), Inventario de los anuros de los bosques antiguos en las Tierras Colectivas Emberá del Río Balsas, en Darién, Panamá; Anidación de tortugas marinas en playa Morrillo; Estudio sobre el dinoflagelado *Prorocentrum lima* y sus interacciones con macroalgas para desarrollar nuevas tecnologías y cultivarlo a gran escala. Se presenta también estudio de la diversidad genética y la conectividad en una muestra de la población de mono aullador *Alouatta coibensis coibensis* de isla Coiba en Panamá. Se realiza un primer listado de la diversidad de mamíferos presentes en la Reserva Natural Privada Cerro Chucantí (RNPCC), Darién Panamá. Los servicios ecosistémicos (SE) que provee el Bosque El Colmón de Macaracas a la provincia de Los Santos fue investigada. El tipo de estudio es descriptivo porque identifica y evalúa el nivel de importancia de los SE.

En el área de ciencias de materiales se compararon las características cualitativas y cuantitativas de membranas piezoeléctricas fabricadas con el polímero poli fluoruro de vinilideno, a través de la técnica de electro hilado (TEH).

Con el objetivo de establecer estándares para la toma de decisiones y la planificación estratégica de proyectos, se presenta el uso del análisis PERT (Program Evaluation and Review Technique) y CPM (Critical Path Method), los cuales han emergido como herramientas poderosas para optimizar operaciones y procesos.

Las ecuaciones diferenciales ordinarias para analizar la dinámica del número de estudiantes en la Licenciatura en Docencia de Matemática en términos de su matrícula, reprobación, deserción y aprobación, resultó ser una herramienta útil, se presenta una comunicación corta del estudio. La matemática pura también aporta a este número, el propósito del artículo es definir las funciones clase uno de Baire, estudiar sus propiedades algebraicas y probar que el límite uniforme de una sucesión de funciones de clases uno de Baire es también una función clase uno de Baire.

En el área de las energías limpias se presenta una revisión de como las políticas públicas influyen en el desarrollo e implementación de estas.

Finalmente, en el área de la química se presenta un trabajo sobre implementación de la espectrometría de masas como método de elucidación estructural en la síntesis de compuestos orgánicos con propiedades catiónicas

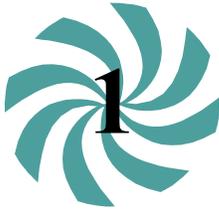


Dr. Eduardo Camacho Astigarrabía

Editor

ÍNDICE

TÍTULO	PÁGINAS
RIQUEZA Y PREVALENCIA DE PARÁSITOS GASTROINTESTINALES PRESENTES EN DOS SUBESPECIES DE MONO AULLADOR EN PANAMÁ (ALOUATTA: LACÉPÈDE, 1799) EN PANAMÁ.....	7-21
ESTUDIO DE LAS RANAS Y SAPOS DE LAS TIERRAS COLECTIVAS DEL RÍO BALSAS, DARIÉN, PANAMÁ.....	22-38
CARACTERIZACIÓN DE LA ACTIVIDAD DE ANIDACIÓN DE TORTUGAS MARINAS EN PLAYA MORRILLO, VERAGUAS, PANAMÁ.....	39-59
INTERACCIÓN DE <i>PROROCENTRUM LIMA</i> CON LAS MACROALGAS <i>AGAROPHYTON CHILENSIS</i> , <i>ULVA</i> SPP. Y <i>CODIUM FRAGILE</i> Y SU EFECTO EN LA ESTIMULACIÓN DEL EPIFITISMO.....	60-91
INFLUENCIA DEL SOLVENTE EN LA SÍNTESIS DE MEMBRANAS PIEZOELÉCTRICAS, BASADAS EN NANOFIBRAS DEL POLÍMERO POLIFLUORURO DE VINILIDENO.....	92-111
GENETIC APPROACH OF THE COIBA ISLAND HOWLER MONKEY <i>Alouatta coibensis coibensis</i> FROM PANAMA, AND ITS CONSERVATION IMPLICATIONS.....	112-128
DIVERSIDAD DE MAMÍFEROS EN LA RESERVA NATURAL PRIVADA CERRO CHUCANTÍ, DARIÉN, PANAMÁ.....	129-150
OPTIMIZACIÓN DE OPERACIONES EN DISTRIBUIDORA MEDIANTE PERT/CPM PARA DETERMINAR ACTIVIDADES CRÍTICAS.....	151-164
DESERCIÓN ESTUDIANTIL DE LA LICENCIATURA EN DOCENCIA DE MATEMÁTICA DE LA UNIVERSIDAD DE PANAMÁ: UN ENFOQUE MEDIANTE ECUACIONES DIFERENCIALES ORDINARIAS.....	165-175
FUNCIONES CLASE UNO DE BAIRE.....	176-195
EVALUACIÓN DE LOS SERVICIOS ECOSISTÉMICOS DEL COMUNAL EL COLMÓN, MACARACAS, PANAMÁ.....	196-215
FUNCIONES CONTINUAS Y NO DIFERENCIABLES EN TODO PUNTO.....	216-230
LA TRANSICIÓN ENERGETICA Y EL PAPEL DE LAS POLÍTICAS PÚBLICAS.....	231-249
SÍNTESIS DE COMPUESTOS ORGÁNICOS CON PROPIEDADES CATIONICAS E IMPLEMENTACIÓN DE LA ESPECTROMETRÍA DE MASAS COMO MÉTODO DE ELUCIDACIÓN ESTRUCTURAL.....	250-271



RIQUEZA Y PREVALENCIA DE PARÁSITOS GASTROINTESTINALES PRESENTES EN DOS SUBESPECIES DE MONO AULLADOR EN PANAMÁ (ALOUATTA: LACÉPÈDE, 1799) EN PANAMÁ

WEALTH AND PREVALENCE OF GASTROINTESTINAL PARASITES PRESENT IN TWO HOWLER MONKEY SUBSPECIES IN PANAMA (ALOUATTA: LACÉPÈDE, 1799) IN PANAMA

Elizabeth G. Govea-Casas

Universidad de Panamá, Facultad de Ciencias Naturales, Exactas y Tecnología, Escuela de Biología, Panamá. elizagc07@gmail.com <https://orcid.org/0000-0002-9318-0957>

Karol M. Gutiérrez-Pineda

Universidad de Panamá, Panamá. gutierrezpinedakm@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0001-9129-7716>

María F. Ortega-Henríquez

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

mariafernandaortegahenriquez@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0002-2012-2879>

Luzmarina A. Ramírez-Baker

Universidad de Panamá, Facultad de Ciencias Naturales, Exactas y Tecnología, Escuela de Biología, Panamá. luzmarinabaker@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0003-1917-701X>

Alexis De La Cruz

Universidad de Panamá, Facultad de Ciencias Naturales, Exactas y Tecnología, Escuela de Biología, Panamá. alexis.delacruz@up.ac.pa

<https://orcid.org/0000-0002-3668-4497>

Pedro G. Méndez-Carvajal

Universidad de Panamá, Facultad de Ciencias, Naturales, Exactas y Tecnología, Departamento de Fisiología y Comportamiento Animal, Panamá.

mendez55.pm@gmail.com,

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

Fecha de recepción: 30 de noviembre de 2022

Fecha de aceptación: 27 de julio de 2023

DOI <https://doi.org/10.48204/j.tecno.v26n1.a4646>

RESUMEN

Nuestro objetivo fue estimar la riqueza y prevalencia de parásitos gastrointestinales presentes en dos subespecies del mono aullador en Panamá (*Alouatta coibensis trabeata* y *Alouatta palliata aequatorialis*). Para la localización de los individuos se recorrieron caminos reales en el corregimiento de Llano Grande, Ocú, Herrera (sitio 1) y el sendero del Camino del Oleoducto del Parque Nacional Soberanía (sitio 2), donde hicimos búsqueda directa en el dosel e indirecta por rastro (vocalizaciones) con Azimut. Para la colecta de las heces para colocarlas en envases con formol al 10%. Logrando la colecta de 15 muestras en el sitio 1 y 17 en el sitio 2. Utilizamos el método de Ritchie para procesar las muestras y en la identificación de los parásitos utilizamos un microscopio con objetivos de 10x y 40x. Se encontró una riqueza total de nueve géneros de parásitos entre ambas áreas, con una diferencia de géneros del 20% según el índice de Whittaker (1960). En las muestras de *A. c. trabeata* (sitio 1) calculamos una riqueza parasitaria de siete, el parásito con mayor prevalencia fue *Entamoeba* sp., (66.7%). En las muestras de *A. p. aequatorialis* (sitio 2) encontramos una riqueza parasitaria de nueve, el parásito con mayor prevalencia fue *Ascaris* sp. (64.7%). No se encontró diferencias en la riqueza parasitaria ($\chi^2=0.6$, $df=1$, $p=0.438$). La presencia de algunos géneros de parásitos podría indicar una posible antropozoonosis, se recomienda hacer pruebas moleculares para la confirmación de las especies.

PALABRAS CLAVES

Área conservada, fragmentación, parasitosis, prevalencia, riqueza.

ABSTRACT

Our objective was to estimate the richness and prevalence of gastrointestinal parasites present in two subspecies of the howler monkey in Panama (*Alouatta coibensis trabeata* and *Alouatta palliata aequatorialis*). To locate the individuals, real roads were traveled in the township of Llano Grande, Ocú, Herrera (site 1) and the path of the Camino del Oleoducto of the Soberanía National Park (site 2), where we made a direct search in the canopy and an indirect search by trail (vocalizations) with Azimuth. For the collection of the samples, it was expected that the individuals defecated, then we took the superficial part of the feces to place them in containers with 10% formaldehyde. Achieving the collection of 15 samples at site 1 and 17 at site 2. We used the Ritchie method to process the samples and to identify the parasites we used a microscope with 10x and 40x objectives. A total richness of nine genera of parasites was found between both areas, with a gender difference of 20% according to the Whittaker (1960) index. In samples of *A. c. trabeata* (site 1) we calculated a parasite richness of seven, the parasite with the highest prevalence was *Entamoeba* sp., (66.7%). In samples of *A. p. aequatorialis* (site 2) we found a parasite richness of nine, the parasite with the highest prevalence was *Ascaris* sp. (64.7%). No differences were found in parasite richness ($\chi^2=0.6$, $df=1$, $p=0.438$). The presence of some genera of parasites could indicate a possible anthrozoosis, it is recommended to perform molecular tests to confirm the species.

KEY WORDS

Conserved areas, fragmentation, parasitosis, prevalence, richness.

INTRODUCCIÓN

Los monos aulladores son primates no-humanos del género *Alouatta* que pueden vivir en entornos variables, desde áreas de bosque conservado, hasta zonas de bosque fragmentados, promoviendo las interacciones intraespecíficas e interespecíficas (Crockett, 1998; Stuart et al., 1998; Youlatos et al., 2015). Las relaciones interespecíficas parásito-primates no-humanos han sido estudiadas en diferentes especies del género *Alouatta*, donde los ciclos de desarrollo de diferentes parásitos se relacionan con las actividades diarias del mono aullador, permitiendo un aumento o no de las probabilidades de transmisión parasitaria (Kowalewski & Gillespie, 2009; Stuart et al., 1998). Estudiar la riqueza y prevalencia de parásitos en poblaciones de monos aulladores nos da información sobre el estado del hábitat, patrones en su alimentación, frecuencia de contacto con huéspedes intermedios, para conocer los posibles huéspedes intermedios, los patrones de distribución del huésped, las interacciones sociales afiliativas, competitivas o agonistas, entre otros (Kowalewski & Gillespie, 2009; Stuart et al., 1998). Considerando a los parásitos como especies indicadoras del estado del hábitat y del estado de salud de los monos aulladores (Stuart & Strier, 1995).

Los cambios antropogénicos en la continuidad boscosa de un hábitat están alterando la dinámica huésped-hospedador, promoviendo el aumento de la transmisión de endoparásitos entre los humanos, la vida silvestre y los animales domésticos (Gillespie & Chapman, 2006; Macpherson, 2005). Esto puede afectar la salud del huésped, causando efectos patológicos, inmunosupresión, cambios en la susceptibilidad y el riesgo de infección (Chapman, 2005). Los resultados serían de una morbilidad y mortalidad elevada, hasta causar una disminución de la población del hospedador (Youlatos et al. 2015). Esto hace que surja la necesidad de estudiar los cambios en la dinámica parásito-mono aullador en estado silvestre, los parámetros que rigen la aparición y prevalencia de parásitos en los monos aulladores (Gillespie & Chapman, 2006; Youlatos et al., 2015;). Estos trabajos suelen ser de importancia para efectos de vigilancia de zoonosis a nivel de salud, y para la conservación de las especies (Stoner, 2005).

Existen esfuerzos sobre estos estudios parásito-primate en Latinoamérica: por ejemplo; en el Sur de México se buscó comparar las infecciones parasitarias en áreas fragmentadas versus áreas conservadas en grupos de *Alouatta palliata mexicana* en la Reserva de la Biosfera, Los Tuxtlas (RBLT) vs grupos de monos aulladores viviendo en un paisaje fragmentado al noreste de la reserva de la biosfera. De igual manera, muestrearon grupos de *Alouatta pigra* en bosques de los estados de Campeche y Chiapas (Trejo-Macías et al., 2007). En estos estudios se encontró que la prevalencia parasitaria en las poblaciones de ambas especies del género *Alouatta* fueron mayores en el hábitat fragmentado que en los bosques continuos y/o protegidos (Trejo-Macías

et al., 2007). Estos resultados asocian la prevalencia de los parásitos con el tamaño promedio del grupo, pero no a la densidad poblacional en *Alouatta pigra* (Trejo-Macías et al., 2007). Por otro lado, investigadores han estudiado como la reducción drástica del bosque a pastizales y monocultivos agroindustriales en el valle del río Magdalena Medio, Colombia, alteran la dinámica parásito-primate no humano, por medio de la evaluación de la estacionalidad, prevalencia y riqueza de parásitos intestinales en tres especies de primates neotropicales: *Cebus versicolor*, *Ateles hybridus* y *Alouatta seniculus* (Rondón et al., 2017). Estos trabajos sugieren que la fragmentación del hábitat conduce a una mayor prevalencia parasitaria (Rondón et al., 2017).

En varios puntos de Costa Rica, se caracterizó los parásitos intestinales en diferentes individuos de mono aullador (*Alouatta palliata*) y relacionaron las infecciones parasitarias con las condiciones ambientales, la población de monos aulladores y la presencia humana (Chinchilla et al., 2005). En la Estación Biológica Bilsa al noroeste de Ecuador, encontraron una relación directamente proporcional entre el tamaño del grupo de monos aulladores (*A. p. aequatorialis*) y la riqueza de especies de parásitos; donde los grupos más grandes albergaron un mayor número de especies de endoparásitos (Helenbrook et al., 2015). De esta forma, consideraron que esta relación positiva es producto de varios factores como el tamaño y densidad de grupo, los niveles de estrés individuales, la disponibilidad de alimentos y ámbitos hogareños alterados que los ponen en contacto con áreas contaminadas con parásitos (Helenbrook et al., 2015).

Otro estudio realizado en Parque Nacional Natural Cueva de los Guácharos en Colombia, tuvo como objetivo caracterizar y comparar los parásitos intestinales de dos grupos de monos churucos *Lagothrix lagotricha lugens* y de las personas que habían o no visitado el parque, encontrando que el 76.7% de las muestras de monos colectadas fueron positivas para endoparásitos y dentro de las especies aisladas se encontró un protozoo: *Entamoeba coli* y cuatro helmintos: *Ascaris lumbricoides*, *Raillietenia sp.*, *Enterobium vermicularis* y *Strongyloides sp* (Jiménez & Stevenson, 2014). No se observaron diferencias en la carga parasitaria entre los dos grupos, tampoco se reportaron parásitos compartidos entre los monos churucos y los humanos estudiados (Jiménez & Stevenson, 2014). Esto último nos deja saber que quizás el uso del hábitat entre monos churucos y humanos podría no ser tan compartido, y podría sugerir un buen manejo paisajístico para la reserva.

Los primeros estudios realizados sobre la parasitología en primates no humanos de Panamá datan de los trabajos descriptivos de Herbert Clark en 1929 en sangre, y la caracterización de los parásitos intestinales en primates no humanos de Panamá por Thatcher y Porter en los años 60 (Thatcher & Porter, 1968). Actualmente existen dos

especies del género *Alouatta*, *Alouatta palliata* (*A. p. aequatorialis*, *A. p. palliata*) con estructura grupal multimacho:multihembra y *Alouatta coibensis* (*A. c. coibensis* y *A. c. trabeata*) con estructura unimacho-multihembra (Méndez-Carvajal et al., 2013; Méndez-Carvajal, 2010). Ambas especies se encuentran amenazadas por los constantes cambios antropogénicos en sus ámbitos hogareños (Cuarón et al., 2022a; Cuarón et al., 2022b; Cuarón et al., 2022c; Méndez-Carvajal et al., 2021). Estos cambios podrían estar afectando la dinámica parásito-mono aullador, por lo que es necesario saber cuál es la riqueza y prevalencia de estas especies en sus diferentes rangos de distribución, si la formación de sus estructuras grupales y estado del hábitat influyen en estas variables.

El objetivo de este estudio fue estimar la riqueza y prevalencia de endoparásitos intestinales presentes en dos subespecies del género *Alouatta* (*Alouatta coibensis trabeata* y *Alouatta palliata aequatorialis*). Buscamos probar la hipótesis propuesta por W. J. Freeland (1976), modificada por Altizer et al (2003) en el que se considera que el número de especies de parásitos intestinales es en función del tamaño del grupo. También buscamos probar que las áreas fragmentadas promueven el hacinamiento de los grupos aumentando la prevalencia de los parásitos gastrointestinales. Donde, *A. c. trabeata* va a presentar mayor prevalencia de parásitos intestinales que *A. p. aequatorialis*. Los resultados obtenidos serán valiosos en las futuras planificaciones de estrategias para la conservación de estas dos subespecies de monos aulladores, proteger la salud humana y demás animales, en sus rangos de distribución.

MATERIALES Y MÉTODOS

Áreas de estudio

El estudio fue realizado en dos sitios de diferentes provincias de Panamá. El sitio 1 ubicado en el corregimiento de Llano Grande, distrito de Océ, Herrera, en este sitio podemos encontrar la especie *Alouatta coibensis*, subespecie *Alouatta coibensis ssp trabeata*. El sitio 2 ubicado en el Camino del Oleoducto, Parque Nacional Soberanía, Colón, en este sitio encontramos a *Alouatta palliata*, subespecie *Alouatta palliata ssp aequatorialis*.

Sitio 1. El corregimiento de Llano Grande, distrito de Océ, Herrera (07°59'16" N, 80°40'31" O) (Figura 1), presenta planicies que los lugareños han utilizado en su mayoría para realizar actividades de subsistencia como la ganadería y cultivos de diferentes tipos, lo que implica el uso de agroquímicos y quema de los suelos. Estas actividades han fragmentado los bosques dejando principalmente cercas vivas que conectan a algunos parches de bosques (Méndez-Carvajal, 2010). La provincia de Herrera presenta en general Bosque Seco Tropical (Méndez-Carvajal, 2010). Posee un clima cálido-seco, con una precipitación anual de 1,650.5 mm, con temperaturas

promedio de 33.35°C, rango de 28.35°C a 23.35°C (Gillespie, 2006; INEC, 2015). Para la región norte de Azuero (Herrera) se ha estimado un promedio de 23 individuos (rango 15–39) ind/grupo de *A. c. trabeata* (Méndez-Carvajal, 2013).

Figura 1.
Áreas de estudio.



Sitio 2. El Camino del Oleoducto del Parque Nacional Soberanía (PNS), Colón (09°05'02.6" N, 79°39'48.2" O), presenta un Bosque Húmedo Tropical (IGNTG, 2007), según las zonas de vida de Holdridge. El PNS cuenta con una extensión de 221.04 km² de Bosque. La temperatura promedio anual para el área es de 28.35 °C, rango de 23 a 33.75°C, posee una precipitación pluvial promedio de 1,331 mm (INEC, 2015). Actualmente es una zona de importancia ecoturística, por ser un refugio de vida silvestre. Los últimos reportes sobre la población de los monos aulladores (*A. p. aequatorialis*) en este sitio han calculado un promedio de 15 ind/grupo (SD±8; 2 a 24) (Méndez-Carvajal & Gutiérrez-Pineda, 2020).

Colecta, procesamiento y observación de las muestras

Las muestras de heces de mono se recogieron de forma no invasiva, se esperó a que los individuos defecaran y luego se siguió el protocolo de Gillespie (2006). Previó a tomar las muestras se realizaron observaciones macroscópicamente para evaluar la consistencia, la presencia de sangre, moco, entre otras. Para la colecta de las muestras se prepararon tubos con formol al 10%, luego nos colocamos guantes y con un

aplicador de plástico que contenía cada tubo o una espátula se tomaron aproximadamente 2 g de la muestra. Procuramos tomar muestra de la parte superior y de entre las heces, evitando tomar muestra que hayan tocado el suelo y la colocamos enseguida en el envase, reduciendo los riesgos de contaminación por nematodos de vida libre en el entorno inmediato. De manera seguida, procedimos a colocar un número de identificación, fecha, el sexo, la edad (infante, juvenil, o adulto) del individuo muestreado, especie de primate no humano, nombre del lugar y sus coordenadas, nombre de los colectores (Gillespie, 2006; Howat, & Wilson, 2014). Las muestras colectadas en Herrera fueron llevadas al laboratorio de Calidad de Agua del Ministerio de Salud de Los Santos. Las muestras colectadas en el Parque Nacional Soberanía fueron llevadas al laboratorio de Fisiología general del Departamento de Fisiología y Comportamiento Animal de la Universidad de Panamá.

Para el procesamiento de las muestras utilizamos la técnica de concentración fecal: formol éter/acetato de etilo para la recuperación de huevos y larvas de helmintos (Botero & Restrepo, 2012). Las muestras colectadas en el campo se agitaron en sus viales y luego fueron filtradas. Se utilizó un dispositivo de filtración adaptado a un tubo de centrifugación receptor, del líquido filtrado se tomaron 2 mL y fueron colocados en un tubo de centrifuga de 15 mL, posterior a eso le agregamos 8 mL del reactivo formol éter y 4 mL de acetato de etilo. Cerramos el tubo y agitamos por 30 segundos para posteriormente centrifugar durante 10 minutos a 500-600 rpm. Luego se descartaron las tres primeras capas obtenidas en el tubo, dejando el sedimento/microgránulo (Botero & Restrepo, 2012). Para la identificación de los huevos, ooquistes, quistes y larvas de parásitos gastrointestinales colocamos sobre un portaobjeto limpio una gota del sedimento obtenido en la centrifugación y a este le colocamos una gota de solución de lugol y luego el cubreobjeto. Observamos una placa por muestra en objetivos de 10x y 40x en un microscopio (Leica DM500). A las formas parasitarias observadas se les tomó una foto para posterior identificación basándonos en las características morfológicas de los microorganismos.

Análisis de los datos

Utilizamos el programa RStudio versión 4.1.1 para los análisis estadísticos. Calculamos la riqueza total de parásitos gastrointestinales encontradas en ambos sitios de muestreo y la riqueza por especie de mono aullador en ambos sitios. También calculamos la prevalencia parasitaria gastrointestinal para ambas especies de monos aulladores. Utilizamos el índice de Whittaker (1960) para estimar el porcentaje de diferencia en número de parásitos gastrointestinales encontrados en ambas especies de monos. También comparamos la riqueza de parásitos gastrointestinales encontradas en ambas especies de primates con la prueba de χ^2 de Pearson's. De igual manera, comparamos el número de especies de parásitos gastrointestinales por muestras entre las dos áreas de estudio, se verificó la normalidad de los datos con la prueba de Shapiro

Wilk, dando que los datos no presentan normalidad ($W=0.8616$, $p=0.0007$), utilizamos la prueba no paramétrica U de Mann Whitney.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Logramos la colecta y procesamiento de 15 muestras fecales de *A. c. trabeata* en Llano Grande de Ocú, con un promedio de 2.4 ($SD\pm 0.7$) especies de parásitos gastrointestinales por muestra. En el Parque Nacional Soberanía logramos colectar y procesar 17 muestras fecales de *A. p. aequatorialis*, con un promedio de 2 ($SD\pm 1.1$) especies de parásitos gastrointestinales por muestra. Se encontró que no hubo diferencias en el número de especies de parásitos gastrointestinales por muestra encontrados en ambas especies de mono aullador ($Chi^2=0.6$, $df=1$, $p=0.4386$).

La riqueza total encontrada en ambas áreas fue de nueve especies de parásitos gastrointestinales (Tabla 1). Según el índice de Whittaker (1960), existe una diferencia del 20% en el número de especies de parásitos gastrointestinales encontrados entre ambas especies de monos. Donde ambas especies de mono aullador comparten seis de los parásitos identificados (Tabla 1), sin diferencias en la riqueza total entre ambas áreas ($Chi^2=0.6$, $df=1$, $p=0.438$). Consideramos que esto podría estar relacionado con el tamaño de los grupos, ya que la especie *A. c. trabeata* normalmente presenta una estructura unimacho:multihembra con un promedio de 9.6 ($SD\pm 3.3$) ind/grupo (Méndez-Carvajal, 2013). Sin embargo, en el área de estudio Llano Grande de Ocú han reportado rangos de grupos de 15 a 39 ind/grupo, esto como resultado de la fragmentación causando un hacinamiento (Méndez-Carvajal, 2013). Estos tamaños de grupo son parecidos a los reportados para *A. p. aequatorialis* en el Camino del Oleoducto del PNS (Méndez-Carvajal & Gutiérrez-Pineda, 2020). Al ser el tamaño de los grupos parecidos, el número de especies de parásitos gastrointestinales podría ser similar. Esto último concuerda con la hipótesis propuesta por Freeland (1976), modificada por (Altizer et al., 2003) en el que el número de especies de parásitos gastrointestinales va en función del tamaño del grupo.

De igual manera, los valores de riqueza encontrados en este estudio son bajos, lo que coincide a lo reportado para las especies del género *Alouatta* donde los rangos de especies de parásitos por población van de dos a 12 (Martínez-Mota et al., 2015). Estos valores bajos de riqueza parasitaria son considerados como resultado de la vida arborícola de los monos aulladores, ya que evitan el contacto con las etapas infecciosas de algunas especies de parásitos que se encuentran más comúnmente en el suelo (Martínez-Mota et al., 2015).

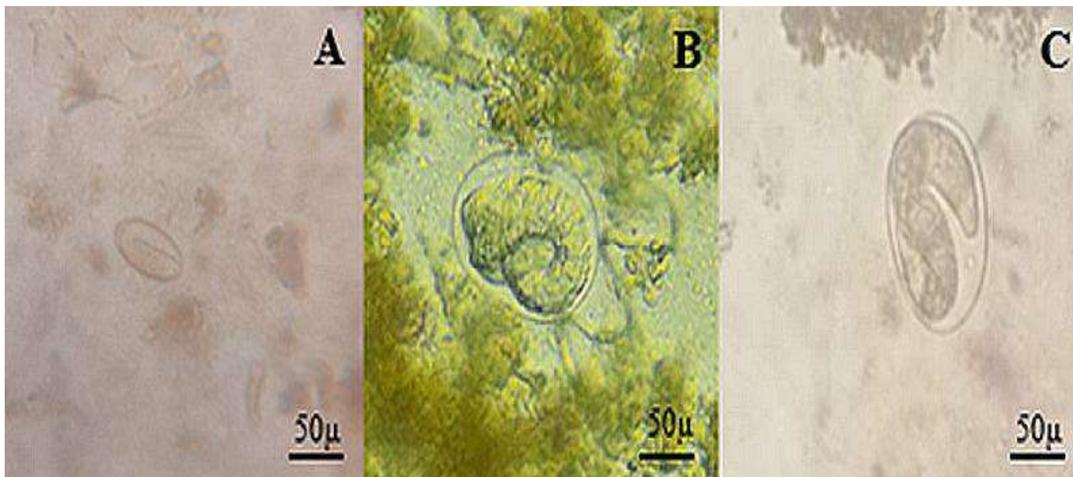
Tabla 1.

Riqueza y prevalencia de parásitos gastrointestinales encontrados en A. c. trabeata en un área fragmentada y en A. p. aequatorialis en un área conservada de Panamá.

Especies Riqueza Parásitos	<i>A. c. trabeata</i> <i>n=15</i> 6		<i>A. p. aequatorialis</i> <i>n=17</i> 9	
	Número reportado	Prevalencia (%)	Número reportado	Prevalencia (%)
<i>Entamoeba</i> sp.	22	66.7	1	5.9
<i>Giardia</i> sp.	-	-	1	5.9
<i>Ancylostoma</i> sp.	5	26.7	16	47.1
<i>Ascaris</i> sp.	5	33.3	48	64.7
<i>Enterobius</i> sp.	16	46.7	2	5.9
<i>Strongyloides</i> sp.	11	46.7	7	41.2
<i>Trypanoxyuris</i> sp.	1	6.67	1	5.9
<i>Capillaria</i> sp.	-	-	1	5.9
<i>Dipylidium</i> sp.	-	-	3	11.8

Figura 2.

Parásitos gastrointestinales observados en monos aulladores de Panamá. A) Huevo larvado de Enterobius sp.; B) Strongyloides sp. C) Huevo larvado de Strongyloide sp.



Se encontró que las muestras fecales analizadas de *A. c. trabeata* en Llano Grande de Ocú, y las de *A. p. aequatorialis* en el PNS presentaban al menos una especie de parásito gastrointestinal. Por otro lado, la prevalencia de los parásitos encontrados fue muy variada para ambos sitios, e incluso entre los parásitos que compartieron. En las muestras de *A. c. trabeata* se encontró que el 50% de los parásitos presentaron una prevalencia media, donde *Entamoeba* sp, tuvo mayor prevalencia, seguido por de *Enterobius* sp. y *Strongyloides* sp. La presencia de estos dos últimos puede estar relacionado con la fragmentación del bosque, ya que los monos aulladores al ~~contactar~~ al suelo aumentan la probabilidad de contacto con desechos de animales domésticos o humanos. Por otro lado, los estadios infectivos de estos parásitos sobreviven favorablemente en suelos húmedos y ambientes cálidos, cabe señalar que las muestras fueron colectadas en estación lluviosa facilitando la supervivencia y detección de estas formas parasitarias (Rondón et al., 2017).

En el caso de *A. p. aequatorialis* se encontró que 33.3% de los parásitos presentaron una prevalencia media, donde *Ascaris* sp. presentó mayor prevalencia, seguido por *Ancylostoma* sp. y luego *Strongyloides* sp. Consideramos que la variación en la prevalencia de estos parásitos va a depender de los factores ambientales y ecológicos que promueven su ciclo. La presencia de *Giardia* sp. es de importancia zoonótica ya que infectan la vida silvestre, el ganado y los humanos, la giardiasis se ha convertido en una enfermedad preocupante para la salud humana (Jiménez & Stevenson, 2014; Rondón et al., 2017;). La presencia de este parásito en los grupos del PNS es inusual, porque es un área conservada. Sin embargo, durante las giras de campo se observó la presencia de caminantes con canidos domésticos, por lo que consideramos que puede ser una infección cruzada humanos-animales domésticos y el mono aullador.

Los resultados aquí presentados son preliminares y solo incluyeron el número de individuos por grupo y la estructura del bosque, sin embargo, recomendamos evaluar los cambios ecológicos y del microclima para tener una mayor idea sobre los factores próximos que promueven el parasitismo en los monos aulladores. También se recomienda los análisis moleculares de los parásitos encontrados para determinar las especies.

CONCLUSIONES

No se encontró diferencias en la riqueza entre *A. c. trabeata* y *A. p. aequatorialis*. Consideramos que podría ser porque ambas especies presentan un tamaño de grupo parecido. Donde *A. c. trabeata* en la provincia de Herrera presenta un aumento en el número de individuos por grupo debido al hacinamiento. La riqueza parasitaria reportada en este estudio coincide con la reportada para el género *Alouatta*, la cual

es baja en comparación a la reportada para otros primates no-humanos. Esto podría ser por la vida arborícola que llevan los monos aulladores, evitando las etapas infecciosas de parásitos que se encuentran comúnmente en el suelo. La prevalencia de parásitos como *Entamoeba sp.*, *Ascaris sp.* y la presencia de *Giardia sp.* y *Dipylidium sp.*, indican una posible antropozoonosis, se recomienda hacer pruebas moleculares para la confirmación de las especies.

AGRADECIMIENTO

Agradecemos a la Fundación Pro-Conservación de los Primates Panameños (FCPP) por el financiamiento del proyecto, a Coiba-AIP por el aporte económico para las giras de campo a Ocú. A la familia Gonzáles por permitir el acceso a sus terrenos para los muestreos. A la Junta Comunal de Ocú por su colaboración en el transporte hacia el sitio de estudio. A Analeidys Gonzáles, Adyani Arias, Elizabeth Casas y Jeami Newbold por su colaboración durante el estudio. Al Departamento de Calidad de Agua de la Regional de Salud de Los Santos y al Departamento de Fisiología y Comportamiento.

REFERENCIAS

- Aguilar Cucurachi, M., Canales Espinosa, D. & Paz Rodríguez, M. (2007). Parásitos gastrointestinales en mono aullador (*Alouatta palliata*) en la región de Los Tuxtlas, Veracruz, México.
- Altizer, S., Nunn, C. L., Thrall, P. H., Gittleman, J. L., Antonovics, J., Cunningham, A. A., Cunningham, A. A., Dobson, A. P., Ezenwa, V., Jones, K. E., Pedersen, A. B., Poss, M., & Pulliam, J.R. C. (2003). Social Organization and Parasite Risk in Mammals: Integrating Theory and Empirical Studies. *Annu. Rev. Ecol. Evol. Syst.*, 34, 517–547. <http://www.jstor.org/stable/3003378>.
- ANAM (Autoridad Nacional del Ambiente) (1999). Plan de Manejo Ambiental del Parque Nacional Soberanía. República de Panamá.
- Botero, D., & Restrepo, M. (2012). Parasitosis humanas. 5th ed. Medellín, Colombia, 691-693.
- Chapman, C. A., Gillespie, T. R. & Goldberg, T. L. (2005). Primates and the ecology of their infectious diseases: How will anthropogenic change affect host-pathogen interactions: *Evol. antropopol.*, 134–144.

- Chinchilla Carmona, M., Guerrero Bermúdez, O., Gutiérrez- Espeleta, G. A, Sánchez Porras, R. & Rodríguez Ortiz, B. (2005). Parásitos intestinales en monos congo *Alouatta palliata* (Primates: *Cebidae*) de Costa Rica. *Rev. Biol. Trop.*, 53 (3-4), 437- 445.
- Chinchilla, M., Urbani, B., Valerio, I. & Vanegas, J. (2010). Parasitosis intestinal en monos capuchinos cariblancos *Cebus capucinus* (Primates: *Cebidae*) de un área protegida en la provincia de Limón, noreste de Costa Rica. *Rev. Biol. Trop.*, 58, 1335- 1346.
- Crockett C. M. (1998). Biología de la Conservación del Género *Alouatta*. *Int. J. Primatol*, 19, 549– 578.
- Cuarón, A. D., Palacios, E., Morales-Jiménez, A. L., Shedden, A., Rodríguez-Luna, E., de Grammont, P.C., Méndez- Carvajal, P.G. & Cortés-Ortiz, L. (2020). *Alouatta palliata ssp. trabeata*. The IUCN Red List of Threatened Species 2020: e.T43900A17979140. <https://dx.doi.org/10.2305/IUCN.UK.2020-2.RLTS.T43900A17979140>.
- Cuarón, A. D., Shedden, A., Rodríguez-Luna, E., de Grammont, P.C., Link, A., Williams-Guillén, A. K., Rosales-Meda, M., Solano, D., P.G., Méndez-Carvajal., & Cortés-Ortiz, L. (2020). *Alouatta palliata ssp. palliata*. The IUCN Red List of Threatened Species: e.T43928A17978956. <https://dx.doi.org/10.2305/IUCN.UK.2020-2.RLTS.T43928A17978956.en>.
- Cuarón, A. D., Shedden, A., Rodríguez-Luna, E., de Grammont, P.C. & Link, A. (2020). *Alouatta palliata ssp. aequatorialis*. The IUCN Red List of Threatened Species 2020: e.T919A17979025. <https://dx.doi.org/10.2305/IUCN.UK.2020-2.RLTS.T919A17979025.en>.
- Freeland W. J. 1976. Pathogens and the Evolution of Primate Sociality. *Biotropica*, 8(1), 12–24. <https://doi.org/10.2307/2387816>.
- Gillespie, T. R. & Chapman, C. A. (2006). Prediction of parasite infection dynamics in primate metapopulations based on attributes of forest fragmentation. *Conserv. Biol.*, 20, 441–448.
- Gillespie, T. R. (2006). Noninvasive assessment of gastrointestinal parasite infections in free-ranging primates. *International Journal of Primatology*, 27, 1129–1143.

- Helenbrook, W. D., Wade, S. E., Shields, W. M., Stehman, S. V., & Whipps, C. M. (2015). Gastrointestinal Parasites of Ecuadorian Mantled Howler Monkeys (*Alouatta palliata aequatorialis*) Based on Fecal Analysis. *J. Parasitol.*, 101(3), 341-350. <https://doi.org/10.1645/13-356.1>.
- Howat, W. J., & Wilson, B.A., (2014). Tissue fixation and the effect of molecular fixatives on downstream staining procedures. *Methods*, 70(1), 12-19.
- IGNTG (Instituto Geográfico Nacional Tommy Guardia). (2007). Atlas Nacional de la República de Panamá. 4ta edición. Novo Art, S. A. Panamá.
- INEC- Instituto Nacional de Estadística y Censo. (2010). XI Censo de Población y VII de Vivienda de Panamá: Año 2010. www.inec.gob.pa/panbin/RpWebEngine.exe/Portal?BASE=LP2010.
- INEC-Instituto nacional de Estadística y censo. (2015). Promedio de temperatura máxima, mínima y media registrada en algunas estaciones meteorológicas de la república. 2015. <https://www.inec.gob.pa/archivos/8211grafica5.pdf>.
- Jiménez, E. J. & Stevenson, P. R. (2014). Parásitos intestinales en monos churucos *Lagothrix lagotricha lugens* del Parque Nacional Natural Cueva de los Guacharos. Laboratorio de Ecología de Bosques Tropicales y Primatología, Universidad de los Andes. <https://repositorio.uniandes.edu.co/bitstream/handle/1992/16493/u686829.pdf?sequence=1>.
- Kowalewski, M., & Gillespie, T. R. (2009). Ecological and anthropogenic influences on patterns of parasitism in free-ranging primates: a meta-analysis of the genus *Alouatta*. *S. American primates*, 433-461. https://doi.org/10.1007/978-0-387-78705-3_17.
- Macpherson C. N. (2005). Human behaviour and the epidemiology of parasitic zoonoses. No. 11-12: 1319-1331. <https://doi.org/10.1016/j.ijpara.2005.06.004>.
- Martínez-Mota, R., Kowalewski M. & Gillespie, T. (2015). Ecological Determinants of Parasitism in Howler Monkeys.
- Méndez-Carvajal, P. G. & Gutiérrez-Pineda, K. M. (2020). Densidad poblacional y estructura grupal del mono aullador (*Alouatta palliata aequatorialis*) en el Parque Nacional Soberanía, Panamá. VIII Simposio de Primates Mesoamericanos.

- Méndez-Carvajal, P. G. (2010). Análisis de vocalizaciones de dos especies de monos aulladores panameños (*Alouatta coibensis* y *Alouatta palliata*: *Atelidae*), República de Panamá.” *Tecnociencia*. 12 (2), 89-108.
- Méndez-Carvajal, P. G. (2013). Population size, distribution, and conservation status of howler monkeys (*Alouatta coibensis trabeata*) and spider monkeys (*Ateles geoffroyi azuerensis*) on the Azuero Peninsula, Panama. *Primate Conserv.*, 26(1), 3-15.
- Méndez-Carvajal, P. G., (2006). Estudio de la población del mono aullador de Azuero (*Alouatta palliata trabeata*: *atelidae*) provincia de Herrera, Panamá. *Tecnociencia*, 8(2): 23-35.
- Méndez-Carvajal, P.G., Cuarón, A.D., Shedden, A., Rodríguez- Luna, E., de Grammont, P.C. & Link, A. (2021). *Alouatta palliata ssp. coibensis* (amended version of 2020 assessment). The IUCN Red List of Threatened Species 2021: e.T43899A195441006.
<https://dx.doi.org/10.2305/IUCN.UK.2021-1.RLTS.T43899A195441006>.
- Méndez-Carvajal, P.G., Ruiz-Bernard, I., De León, G. Y, González, Miranda, E., Loría, L. & Soto, E. (2013). Activities towards primate conservation in Panama. *Wildl. Biol. Pract.*, 9(2), 91-97.
- Rondón, S., Ortiz, M., León, C., Galvis, N., Link, A. & González, C. (2017). Seasonality, richness and prevalence of intestinal parasites of three neotropical primates (*Alouatta seniculus*, *Ateles hybridus* and *Cebus versicolor*) in a fragmented forest in Colombia. *Int. J. Parasitol: Parasites and Wildlife*, 6(3): 202-208.
- Stoner, K.E., González-Di Pierro, A.M. & Maldonado-López, S. (2005). Intestinal parasite infections in primates: implications for conservation. *Universidad y Ciencia*, 2, 61-72.
- Stuart, M. D. & Strier, K. B. 1995. Primates and parasites: A case for a multidisciplinary approach. *Int. J. Primatol.* 16, 577-593.
- Stuart, M., Pendergast, V., Rumfelt, S., Pierberg S., Greenspan, L., Glander K. & Clarke, M. (1998). Parasites of wild howlers (*Alouatta spp.*). *Int. J. Primatol.*, 19, 493- 512.

- Thatcher, V. E. & Porter, J. A. (1968). Some Helminth Parasites of Panamanian Primates. *Trans. Am. Microsc. Soc.*, 87(2), 186.
<https://doi.org/10.2307/3224439>.
- Trejo-Macías, G., Estrada, A. & Mosqueda Cabrera, M. Á. (2007). Survey of Helminth Parasites in Populations of *Alouatta palliata mexicana* and *A. pigra* in Continuous and in Fragmented Habitat in Southern Mexico. *Int J Primatol.*, 28, 931–945. <https://doi.org/10.1007/s10764-007-9137-5>
- Whittaker, R.H. (1960). Vegetation of the Siskiyou Mountains, Oregon, and California. *Ecol. Monogr.*, 30, 279–338.
- Youlatos, D., Kowalewski, M., Garber, P. & Cortés-Ortiz L. (2015). New Challenges in the Study of Howler Monkey Anatomy, Physiology, Sensory Ecology, and Evolution: Where We Are and Where We Need to Go? In: Kowalewski, M., Garber, P., Cortés-Ortiz, L., Urbani, B. and Youlatos, D. (eds) Howler Monkeys. Developments in Primatology: Progress and Prospects. Springer, New York, NY <https://doi.org/10.1007/978-1-493>



Tecnociencia, Vol. 26, N°1: 22-38

Enero-Junio 2024

ISSN L 2415-0940

ESTUDIO DE LAS RANAS Y SAPOS DE LAS TIERRAS COLECTIVAS DEL RÍO BALSAS, DARIÉN, PANAMÁ

BIODIVERSITY SURVEY OF FROGS AND TOADS OF THE TIERRAS COLECTIVAS DEL RIO BALSAS, DARIEN, PANAMA

Heather M. Gray

Montreal, Quebec, Canadá.

grahm@hotmail.com

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

Roberto Ibáñez

Smithsonian Tropical Research Institute, Panamá, Panamá.

ibanez@si.edu

<https://orcid.org/0000-0001-6118-5780>

Andrés Casamá

Tierras Colectivas Emberá del Río Balsas, Darién, Panamá.

tecnociencia@up.ac.pa

Delfino Olea

Tierras Colectivas Emberá del Río Balsas, Darién, Panamá.

tecnociencia@up.ac.pa

Irvin Salazar

Tierras Colectivas Emberá del Río Balsas, Darién, Panamá

tecnociencia@up.ac.pa

Catherine Potvin

Smithsonian Tropical Research Institute, Panamá, Panamá.

cathehrine.potvin@mcgill.ca

<https://orcid.org/0000-0002-5640-9329>

Héctor Barrios

Universidad de Panamá, Maestría Centroamericana de Entomología, Panamá.

hectorbarriosv@up.ac.pa

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

Fecha de recepción: 20 de abril de 2023

Fecha de aceptación: 9 de septiembre de 2023

DOI <https://doi.org/10.48204/j.tecno.v26n1.a4647>

RESUMEN

El objetivo de este estudio fue inventariar los anuros de los bosques antiguos durante los años 2019 y 2022 en las Tierras Colectivas Emberá del Río Balsas, en Darién, Panamá. En la cuenca del Río Balsas se realizaron muestreos diurnos y en las primeras horas de la noche. Los muestreos estuvieron compuestos de: a) observaciones por encuentro visual en los alrededores de tres comunidades y tres sitios adicionales (< 5 km); b) siete transectos de 1 km subdivididos en estaciones de 100 m. La diversidad de anuros registrada fue de 19 especies pertenecientes a 9 familias y 14 géneros. Las especies más abundantes fueron *Craugastor fitzingeri*, *Rhinella alata* y *Dendrobates auratus*. Estas tres especies representaban el 53% de los 215 individuos registrados. La comunidad de anuros diurnos está bien representada en este estudio, ya que la mayoría de los muestreos se realizaron durante el día. Se requieren más muestreos en esta zona para describir completamente la diversidad de anfibios. Nuestro estudio proporciona una línea base para conocer las especies de ranas y sapos que se encuentran en un bosque intacto.

PALABRAS CLAVES

Anfibios, tierras bajas, bosques intactos, diversidad de especies.

ABSTRACT

The objective of this study was to survey the anurans of the old-growth forests in the traditional Emberá territory, Tierras Colectivas del Río Balsas, in Darién, Panama. Diurnal and early evening sampling was conducted in the Río Balsas watershed in 2019 and 2022. Sampling consisted of: a) opportunistic visual encounter observations in the surroundings of three communities and three additional sites (< 5 km); b) seven 1 km transects subdivided into 100 m sections. Anuran diversity recorded was 19 species belonging to 9 families and 14 genera. The most abundant species found were *Craugastor fitzingeri*, *Rhinella alata* and *Dendrobates auratus*. These three species accounted for 53% of the 215 individuals recorded. The diurnal anuran community is well represented in this study as the majority of sampling was done during the day. Further sampling in this area is warranted to fully describe the amphibian diversity. Our study provides a baseline for understanding the frog and toad species in an intact forest.

KEY WORDS

Amphibians, lowland intact forest, species diversity.

INTRODUCCIÓN

El mayor bosque primario intacto de Centroamérica se encuentra en la provincia de Darién, al este de Panamá, y en las Comarca Guna Yala y Embera donde confluyen los bosques de Centroamérica y Sudamérica (Global Forest Watch, 2014). Esta zona se considera un punto clave de alta biodiversidad y alberga muchas especies endémicas (Myers *et al.*, 2000). En Darién destacan la gran altura y

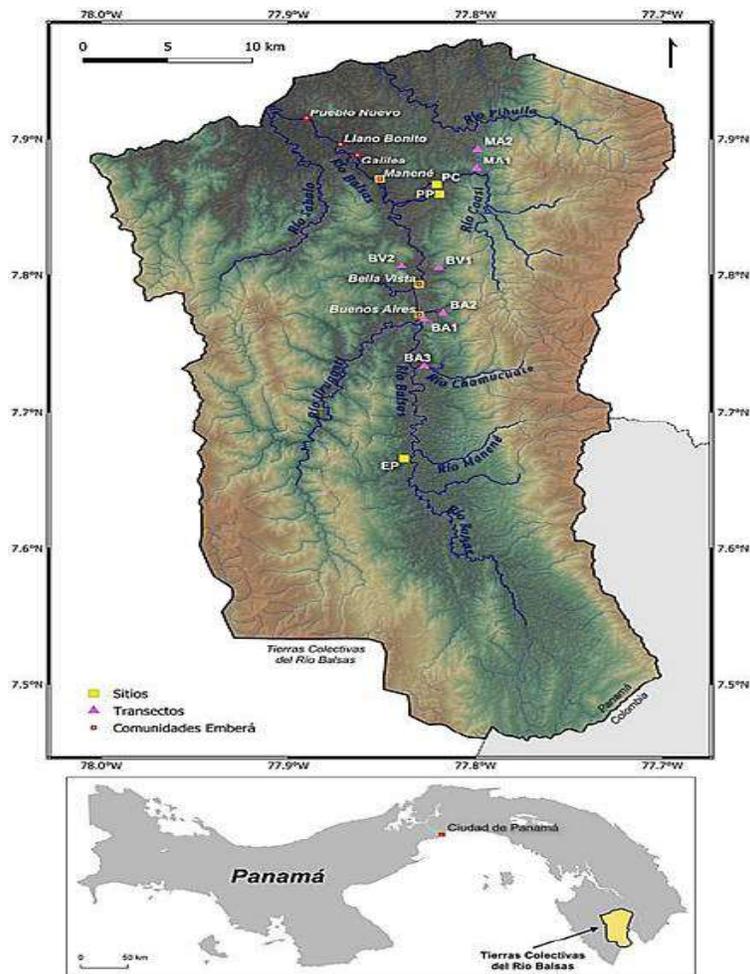
tamaño de los árboles, así como la alta diversidad de especies en los bosques del territorio tradicional emberá Tierras Colectivas del Río Balsas (Mateo-Vega *et al.*, 2019). Esta observación estimuló discusiones con comunidades y autoridades tradicionales y llevó al codesarrollo del proyecto Bacurú Drõa (Bosques Antiguos en Emberá). Bacurú Drõa busca establecer un Observatorio de Bosques Antiguos impulsado por la comunidad, en una asociación entre el pueblo Emberá del río Balsas y un equipo científico para mejorar el conocimiento de los bosques antiguos de Darién, proteger la biodiversidad y mejorar la economía local (Kunz *et al.*, 2022). Los Emberá están interesados en colaborar con los científicos para iniciar el inventario de la biodiversidad de su territorio tradicional. La primera expedición Bacurú Drõa a la cuenca alta del río Balsas tuvo lugar en enero de 2019. Otros trabajos de campo y expediciones continuaron en 2019 y luego en 2022. Los poseedores de conocimientos Emberá, los técnicos y las autoridades tradicionales dirigieron al equipo hacia lo que ellos consideraban los mejores bosques antiguos. Como la región ubicada entre la comunidad de Manené y la frontera colombiana es conocida como un área de tráfico ilegal (Colectivo Darién, 2021), el acceso a la zona requirió la aprobación y el acompañamiento de la policía fronteriza de Panamá, SENAFRONT.

MATERIALES Y MÉTODOS

Este estudio se llevó a cabo en la cuenca sur del río Balsas en el territorio tradicional Emberá Tierras Colectivas del Río Balsas, que se encuentra dentro del Parque Nacional Darién, en el este de Panamá (Figura 1). Las comunidades de Manené, Bella Vista, Buenos Aires, un campamento cerca de la frontera con Colombia (Egoro Purru (EP)), una parcela forestal permanente (PP) y un campamento establecido en un río afluente (PC) sirvieron como bases para la colecta de los datos. Todas las observaciones se realizaron a menos de 5 horas a pie de estos sitios. Todos los sitios estaban ubicados en elevaciones de bajo de (< 250 msnm). Detalles de los parámetros meteorológicos, así como la cobertura vegetal están bien descritos en Kunz *et al.* (2022).

Figura 1.

Mapa del área de estudio en las Tierras Colectivas del Río Balsas en Darién, Panamá.



Muestreo:

Las colectas de campo se realizaron en enero, agosto y diciembre de 2019 así como en enero y julio de 2022. El muestreo se llevó a cabo principalmente durante el día. En diciembre de 2019 y 2022 se realizaron muestreos en las primeras horas de la noche.

Los muestreos diurnos estuvieron compuestos de: a) observaciones de encuentro visual oportunistas (Doan, 2003) en los alrededores de las comunidades y sitios seleccionados (<5 km); b) siete transectos de 1 km. El muestreo de encuentro visual diurno fue

oportunista, ya que el sitio y el tiempo en la zona a buscar dependían de las actividades del proyecto Bacurú Drõa. Los estudios de encuentros visuales nocturnos se realizaron tras la puesta de sol, pero se completaron antes de las 21:00 horas, en los alrededores de las comunidades y lugares seleccionados (<1 km). El tiempo dedicado a la búsqueda de ranas se anotó en todos los muestreos posteriores a enero de 2019. Se fotografiaron todas las ranas y sapos encontrados y se grabó en vídeo a cualquier animal que vocalizara (Olympus Tough TG-4 o TG-5). Se tomaron medidas (longitud hocico-cloaca y de la tibia derecha) con una regla para tener una indicación de la escala. Todos los animales fueron examinados visualmente para detectar enfermedades y deformidades. Para cada animal fotografiado, se anotó información sobre el lugar de captura, la asociación de hábitat (bosque, charca temporal o ribera) y si el hábitat había sufrido el impacto de la perturbación humana (intacto o perturbado).

Información adicional provino de siete transectos establecidos (1 km de largo con estaciones marcadas cada 100 m) que se establecieron en enero de 2019 en bosque primario. Las comunidades de Manené y Bella Vista contaban con dos transectos cada una y Buenos Aires contaba con tres transectos. Los transectos se recorrieron caminando en horas de la mañana, una o dos veces al mes durante los meses de enero, febrero, abril, mayo, julio y agosto. Técnicos locales capacitados recorrían el transecto, a un ritmo de ~1 km/hora, en busca de aves y luego, sentido contrario, en busca de ranas y sapos. Se anotó el número de anuros observados en cada sección de 100 m del transecto, así como el tiempo total que se tardó en recorrer el transecto. En julio de 2019 los técnicos dieron inicio al registro fotográfico de ranas y sapos. En este trabajo solo se han incluido los datos del transecto con identificación fotográfica confirmada en el análisis. Los especímenes fotografiados se capturaban, se median, se identificaban y luego se liberaban en el mismo sitio.

La nomenclatura taxonómica se basa en la filogenia de Amphibia Web (2023) y el estado de conservación de cada especie se basa en las categorías de la Lista Roja de Especies Amenazadas de la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (IUCN, 2022). Se realizó una curva de rarefacción en iNext para visualizar la acumulación de especies con respecto al tamaño de la muestra (Chao *et al.*, 2014; Chao *et al.*, 2016).

Algunos especímenes fueron capturados para su preservación. A estos especímenes se les practicó la eutanasia con Orajel (20% de benzocaína) (Underwood *et al.*, 2013). Para todos los especímenes, se conservó una muestra de tejido del hígado en una solución de DMSO para futuros análisis genéticos. Seguidamente, los animales se

fijaron en una solución de formalina al 10% y se conservaron en etanol al 70%. Los ejemplares se depositarán en la Colección de Herpetología del Instituto Smithsonian de Investigaciones Tropicales (STRI) y en el Museo de Vertebrados de la Universidad de Panamá. El protocolo de muestreo siguió las directrices para el cuidado y uso de animales (Smithsonian Tropical Research Institute IACUC SI-22020) y se llevó a cabo con el permiso de investigación del Ministerio de Ambiente de la República de Panamá (SE/A-57-19).

RESULTADOS

Durante nuestro estudio, documentamos un total de 19 especies de ranas y sapos (Figuras 2 a 4). Las especies pertenecen a 9 familias (Cuadro 1). Dos especies, *Craugastor fitzingeri* y *Rhinella alata*, se encontraron en todos los sitios muestreados (Cuadro 1). Estas dos especies son también las ranas capturadas con mayor frecuencia (Fig. 5). La tercera rana más frecuentemente capturada fue *Dendrobates auratus* y estas tres especies representaron el 53,0% de los individuos capturados (Figura 5). Siete de las 19 especies sólo se encontraron en un sitio y, de éstas, 5 especies están representadas solamente por un individuo. La especie que se encontró en el mayor número de tipos de hábitat fue *Rhinella horribilis*, que se encontró en el bosque, en las orillas de los ríos y en charcas temporales, tanto en sitios intactos como en sitios con impacto antropogénico (Tabla 1).

Mediante el muestreo oportunista se encontraron 203 anuros. La mayor parte del tiempo dedicado a la búsqueda de ranas se llevó a cabo durante el día. Para los cuatro viajes posteriores a enero de 2019, el 75% de la búsqueda se realizó en horas del día (52 horas diurnas y 13 nocturnas). Este esfuerzo dio lugar a que se registraran 122 ranas, el 49% de las cuales fueron capturadas por la noche. Un viaje corto durante la estación húmeda de julio de 2022 representó el 20% del número total de ranas registradas, con solo 2,2 horas de muestreo nocturno en la estación lluviosa que resultó en el 9% de todas las ranas fotografiadas.

Figura 2.

Ranas y sapos de la región sur del río Balsas: A, Rhaebo haematiticus; B, Rhinella alata; C, Rhinella horribilis; D, Teratohyla spinosa juvenil; E, Craugastor fitzingeri; F, Craugastor raniformis; G, Colostethus aff. pratti; H, Dendrobates auratus.



Figura 3.

Ranas y sapos de la región sur del río Balsas (continuación): A, Diasporus aff. pequeno; B, Diasporus aff. quidditus; C, Boana boans; D, Scinax ruber; E, Smilisca sila; F, Engystomops pustulosus; G, Leptodactylus insularum; H, Leptodactylus poecilochilus.

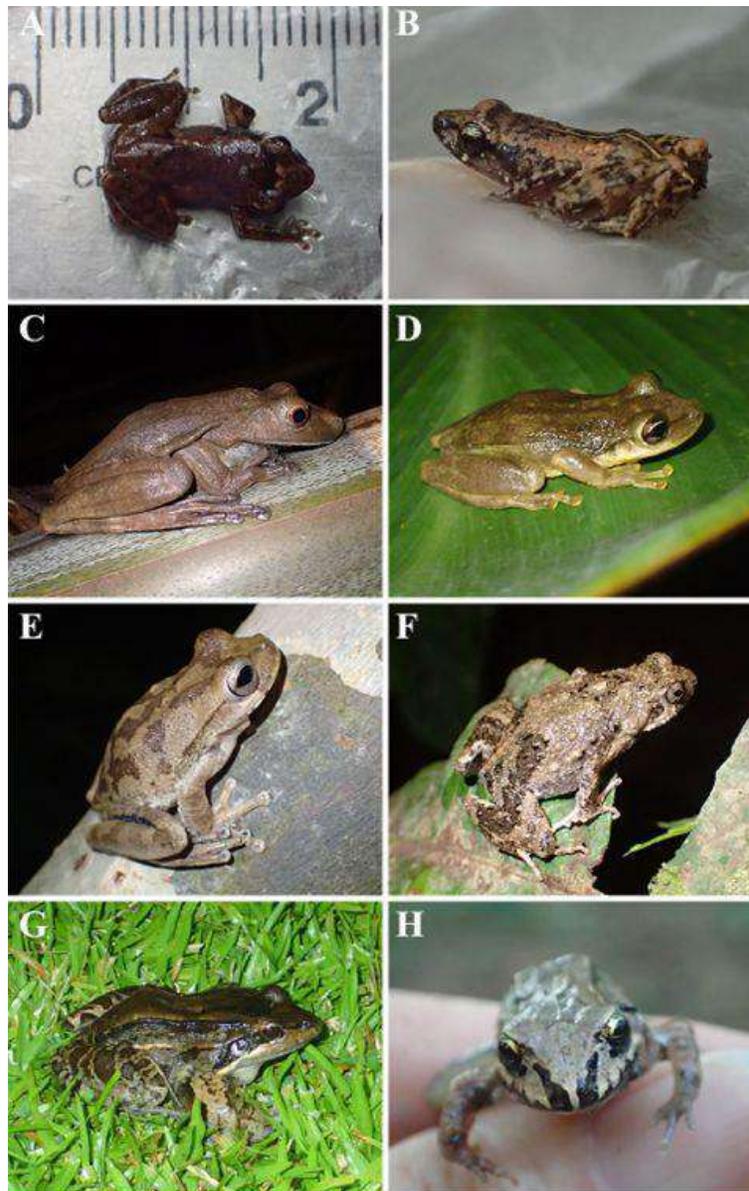


Figura 4.

Ranas y sapos de la región sur del río Balsas (continuación): A, Leptodactylus savagei juvenil, foto de D. Olea; B, Rana (Lithobates) vaillanti; C, Pristimantis taeniatus.

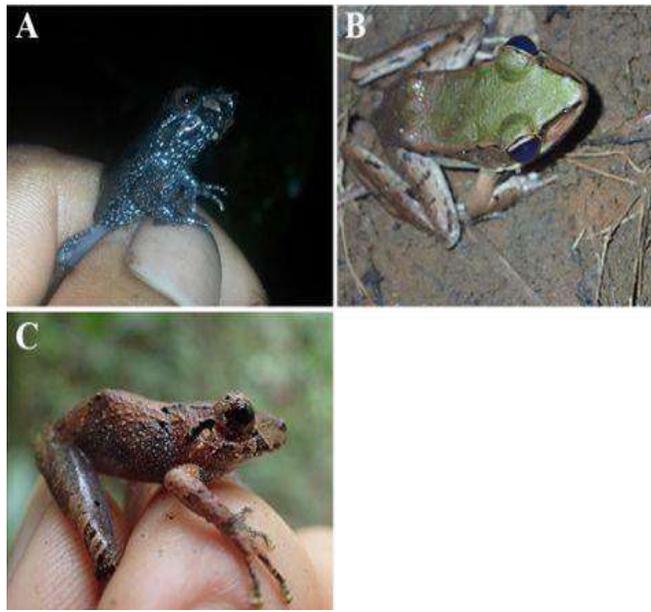


Figura 5.

Porcentaje de individuos fotografiados de cada especie.

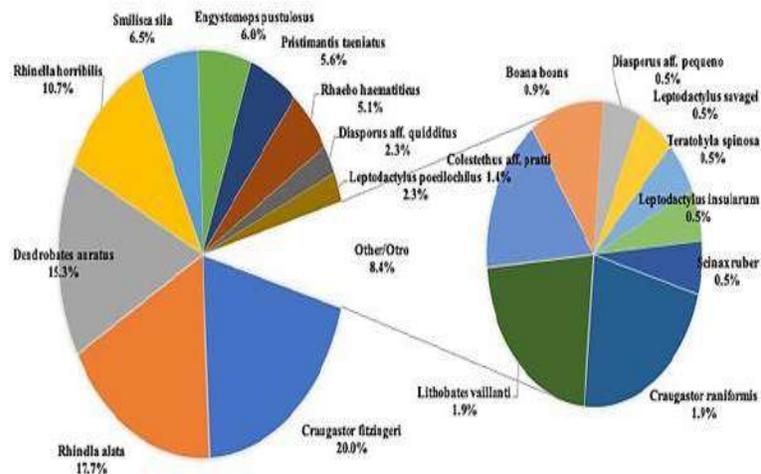


Tabla 1.

Lista de las ranas y sapos de la región sur del río Balsa, con información sobre el estatus de la UICN. Preocupación menor [LC]; casi amenazada [NT]; vulnerable [VU]; en peligro [EN]; en peligro crítico de extinción [CR]; datos insuficientes [DD], los sitios (Egoro Purru [EP], Buenos Aires [BA], Bella Vista [BV], Manené [M], Parcela Permanente [PP], Parcela Campo [PC]), la asociación de hábitat (bosque [B], charco temporal [C], ribereño [R]), y el estado del hábitat (Intacto [I], perturbado [P])

Taxa	UICN estatus	Sitios	Hábitat	Estado
Bufonidae				
<i>Rhaebo haematiticus</i> (Cope, 1862)	LC	EP, BA, M, PC	B	I, P
<i>Rhinella alata</i> (Thomiot, 1884)	DD	todos	B	I, P
<i>Rhinella horribilis</i> (Wiegmann, 1833)	LC	EP, BA, M, PC	B, C, R	I, P
Centrolenidae				
<i>Teratohyla spinosa</i> (Taylor, 1949)	LC	M	R	I
Craugastoridae				
<i>Craugastor fitzingeri</i> (Schmidt, 1857)	LC	todos	B, R	I
<i>Craugastor raniformis</i> (Boulenger, 1896)	LC	EP, BA, M	B, R	I
Dendrobatidae				
<i>Colostethus aff. pratti</i> (Boulenger, 1899)	LC	BV	B	I
<i>Dendrobates auratus</i> (Girard, 1855)	LC	BV, BA, M, PP	B	I, P
Eleutherodactylidae				
<i>Diasporus aff. pequeno</i> (Batista et al, 2016)	CR	BA	B	I
<i>Diasporus aff. quidditus</i> (Lynch, 2001)	LC	BA, PP	B	I
Hylidae				
<i>Boana boans</i> (Linnaeus, 1758)	LC	M	R	I
<i>Scinax ruber</i> (Laurenti, 1768)	LC	M	C	I, P
<i>Smilisca sila</i> Duellman & Trueb, 1966	LC	M, PC	R	I
Leptodactylidae				
<i>Engystomops pustulosus</i> (Cope, 1864)	LC	BA, M, PP	B, C	I, P
<i>Leptodactylus insularum</i> Barbour, 1906	LC	M	C	P
<i>Leptodactylus poecilochilus</i> (Cope, 1862)	LC	EP, M	B, C	I, P
<i>Leptodactylus savagei</i> Heyer, 2005	LC	BV	B	I
Ranidae				
<i>Rana (Lithobates) vaillanti</i> (Brocchi, 1877)	LC	BA, M	R	I, P
Strabomantidae				
<i>Pristimantis taeniatus</i> (Boulenger, 1912)	LC	BV, BA, PP	B	I

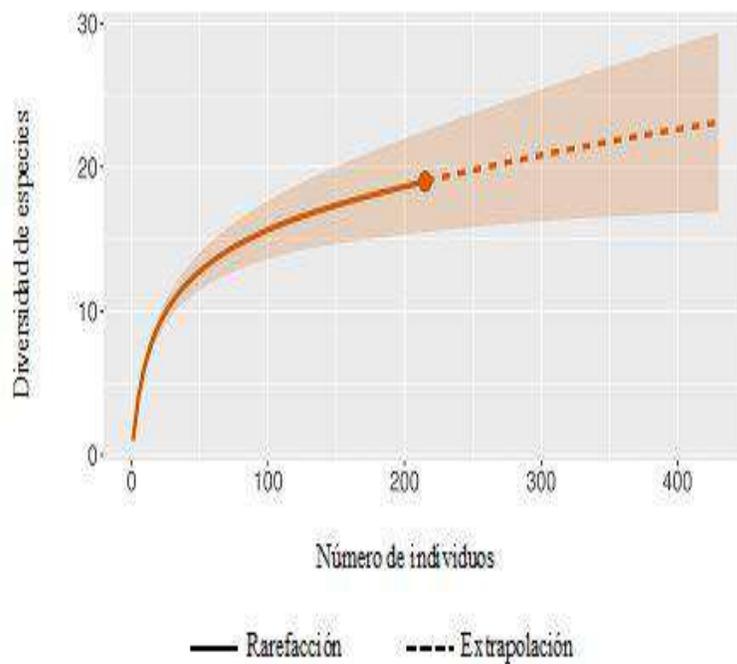
La búsqueda en los transectos dio como resultado un número variable (0-15) de ranas y sapos observados cada vez que estos transectos se recorrieron. El tiempo promedio para recorrer los 1000 m fue de 68,15 minutos (desviación estándar 13,53). En algunas zonas se observaron más ranas que en otras. Los transectos cerca de Manené a menudo no tenían ranas (8 de 18 veces), mientras que aquellos cerca de Bella Vista se vieron un mínimo de 2 ranas cada una de las 12 veces que estos transectos fueron recorridos.

El mayor número de anuros detectados en un transecto fue de 15, observadas en una caminata por un transecto de Bella Vista en abril de 2019 (el promedio de ranas observadas fue de 7 en este sitio). En Buenos Aires hubo 3 transectos que solo se recorrieron 3 veces cada uno. El rango de ranas observadas en los transectos de Buenos Aires fue de 0-3; sin embargo, solo en una ocasión no se vieron ranas. Solo las 12 ranas y sapos de 5 transectos recorridos en julio y agosto de 2019 se utilizaron en el análisis; ya que, se utilizó una cámara fotográfica para registrar a los animales encontrados durante estos recorridos, lo cual permitió confirmar su identificación.

La curva de acumulación de especies no ha alcanzado aún la fase asintótica (Figura 6).

Figura 6.

Curva de rarefacción y extrapolación de la acumulación de especies con respecto al tamaño de muestra con intervalos de confianza del 95%



DISCUSIÓN

América Central tiene una rica diversidad de especies de anfibios y la mayoría de las especies nuevas que se describen en el mundo proceden de América Central y del Sur (Womack *et al.*, 2021). Panamá cuenta con 230 especies de anfibios (AmphibiaWeb, 2023) y la provincia de Darién tiene muchas especies endémicas de anfibios, sobre todo en las tierras altas (Batista *et al.*, 2016; 2020). Los anfibios desempeñan una función importante en la salud de los ecosistemas, incluido un papel en la salud humana (Hocking & Babbitt, 2014; Springborn *et al.*, 2022). Los anfibios no solo se alimentan de insectos, sino que también proporcionan alimento a otros organismos. La disminución del número de anfibios panameños parece haber provocado una cascada trófica que ha llevado a un descenso de la diversidad de serpientes y de su condición corporal (Zipkin *et al.*, 2020). Aunque la destrucción y modificación del hábitat son las principales causas del declive de los anfibios (Womack *et al.*, 2021), los anfibios se han visto afectados por hongos patógenos que han causado colapsos catastróficos en sus poblaciones (Scheele *et al.*, 2019). El estudio de los anfibios en los bosques intactos en los que se centró Bacurú Drõa ofrece una oportunidad única de una comunidad de anfibios que no se ha visto afectado por la modificación del hábitat. Aunque no se tomaron pruebas para detectar hongos quitridios, se evaluó visualmente si los animales estaban enfermos y éstos parecían sanos.

El proyecto Bacurú Drõa se centra en bosques intactos, y este bosque se encuentra colindando con la frontera Panamá-Colombia. Esto trajo como consecuencia preocupación de seguridad limitándonos a que la mayoría de los muestreos de anfibios se realizaran durante el día en estos bosques maduros. Por lo tanto, las especies diurnas de los bosques de tierras bajas están bien representadas en este estudio. Muchas de las especies de ranas encontradas, incluida la más común, *Craugastor fitzingeri*, son especies de desarrollo directo que no dependen del agua para la fase acuática de renacuajo (Hedges *et al.*, 2008). Cabe destacar que una de las ranas de desarrollo directo observadas era un individuo de *Diasporus* aff. *pequeño*. La especie *D. pequeño* es considerada en peligro crítico de extinción, ya que se cree que es endémica de un área de distribución reducida en la Serranía del Darién (IUCN, 2022). Las ranas del grupo *Diasporus* forman parte de un complejo de especies crípticas y existe la posibilidad de que haya más especies no descritas (Batista *et al.*, 2016; Hertz *et al.*, 2012). Las ranas *Diasporus* en este estudio merecen más investigación para entender su relación con las otras especies *Diasporus* en el Darién.

El sapo *Rhinella horribilis* fue muy común dentro de las comunidades; sin embargo, estos animales no fueron fotografiados sistemáticamente, ya que nuestro enfoque no

estaba en las poblaciones de anfibios asociados a asentamientos humanos. La palabra para sapo en Embera (“bocorrô”) se utiliza para referirse principalmente a *R. horribilis*, mientras que la palabra para rana (“bauñiã”) se refiere a las otras ranas y sapos. Aunque las especies de anfibios no reciben nombres individuales que coincidan con la nomenclatura científica, la gente reconoce que los diferentes morfotipos habitan diferentes tipos de hábitat y que los anfibios juegan una función importante en el ecosistema (observación personal, también visto en las comunidades Embera-Katíos colombianas (Racero-Casarrubia *et al.*, 2008)).

De los dos métodos utilizados en este estudio, el muestreo oportunista fue el que aportó más datos. La elección de la ubicación del transecto se hizo para acomodar estudios simultáneos sobre diversidad de aves e insectos. Este compromiso significó que el hábitat muestreado no necesariamente coincidía donde se esperaría encontrar más anfibios. A pesar de ello, se observaron ranas y sapos a lo largo de los transectos. Las diferencias entre los lugares y las personas que recorrían los transectos pueden explicar las diferencias en el número de animales observados en cada transecto. El método de los transectos resultó más útil cuando se fotografiaron los animales, ya que permitió confirmar la identificación de las especies. Aparte de *Dendrobates auratus*, que es reconocible incluso a distancia, la mayoría de las ranas vistas durante el día en los transectos eran pequeñas y marrones, por lo que fue necesario tomarles fotografías.

Como la curva de acumulación de especies no parece haber alcanzado una asíntota, sugiere que todavía quedan especies por encontrar en la región sur del río Balsas (Fig. 6). La frecuencia de encuentros con especies nuevas ha disminuido notablemente durante el día en los hábitats forestales maduros (observación personal). Sin embargo, se escuchó el canto de ranas adicionales, particularmente avanzada la noche, sugiriendo que existe un número mayor de especies en esta región, pero sin especímenes o fotos, estas especies no pudieron ser incluidas en este inventario. Otras áreas de tierras bajas en la provincia de Darién, en donde se han estudiado los anuros, se han encontrado comunidades con 19 a 28 especies (Elizondo-Lara *et al.*, 2020; Medina *et al.*, 2019; Samudio *et al.*, 2015; Sosa-Bartuano *et al.*, 2017). Estos estudios han incluido muestreos que se extienden hasta altas horas de la noche y en la estación lluviosa, lo que sugiere que los bosques del sur de la región del río Balsas pueden tener una mayor diversidad de la que extrapoló con la curva de acumulación de especies, ya que los anfibios nocturnos y de la estación lluviosa están poco representados en nuestro estudio. La rana más abundante en nuestro estudio, *Craugastor fitzingeri*, es una rana común del bosque en Panamá (Elizondo-Lara *et al.*, 2020; Ibáñez *et al.*, 1995) y en el Darién (Sosa-Bartuano *et al.*, 2017). La siguiente especie más común en este estudio, *Rhinella alata*, fue la especie más abundante en los bosques de tierras bajas del cerro

Pirre según Samudio *et al.* (2015) y la segunda especie más abundante de acuerdo con Elizondo-Lara *et al.* (2020). En la lista de especies de nuestro estudio faltan las ranas del género *Hyalinobatrachium*. En las tierras bajas del cerro Pirre, *H. chirripoi* fue la segunda rana más abundante que se encontró (Samudio *et al.*, 2015). Muestreos nocturnos, particularmente durante la estación lluviosa, serán necesarios para establecer si este género generalmente común está también presente en la región del río Balsas.

CONCLUSIONES

Este estudio proporciona datos de línea base preliminares sobre la diversidad de anuros en el área del río Balsas. Para captar toda su diversidad es necesario seguir realizando estudios, particularmente de hábitats distintos, así como más muestreos nocturnos y en la estación lluviosa. El alto número de especies encontradas, dadas las limitaciones del trabajo de campo, sugiere una rica diversidad de anfibios en esta zona protegida y pone de relieve la necesidad de seguir apoyando a las comunidades que protegen de forma sostenible los bosques antiguos.

AGRADECIMIENTO

Agradecemos a Lady Mancilla y Lupita Omi su apoyo logístico. Agradecemos a todos aquellos que se interesaron en localizar y fotografiar anfibios en el campo, incluyendo miembros de la comunidad, personal de SENAFRONT y otros participantes en las expediciones, particularmente Chris Madsen, Matthias Kunz y Brais Marchena. Anderson Salazar, Ember Cupaña, Alquimedes Lona y Benildo Lino proporcionaron asistencia adicional en el campo. La habilidad cartográfica de Matthias Kunz es muy apreciada. Agradecemos al SENAFRONT por prestarnos servicios de transporte y seguridad. Heather Gray agradece especialmente el apoyo continuado de SA MacKenzie. Héctor Barrios y Roberto Ibáñez fueron patrocinados por el Sistema Nacional de Investigación, SENACYT. El trabajo también fue apoyado por el programa de Canada Research Chair a través de Catherine Potvin.

REFERENCIAS

- AmphibiaWeb. (2023). <https://amphibiaweb.org> University of California, Berkeley, CA, USA.
- Batista, A., G. Köhler, K. Mebert, A. Hertz & M. Veselý. (2016). An integrative approach to reveal speciation and species richness in the genus *Diasporus*

- (Amphibia: Anura: Eleutherodactylidae) in eastern Panama. *Zool. J. Linn. Soc.*, 178(2), 267-311.
- Batista, A., K. Mebert, M. Miranda, O. Garces, R. Fuentes & M. Ponce. (2020). Endemism on a threatened sky island: new and rare species of herpetofauna from Cerro Chucantí, Eastern Panama. *Amphib. Reptile Conserv.*, 14(2), 27-46.
- Chao, A., N.J. Gotelli, T.C. Hsieh, E.L. Sander, K.H. Ma, R.K. Colwell & A.M. Ellison. (2014). Rarefaction and extrapolation with Hill numbers: a framework for sampling and estimation in species diversity studies. *Ecol. Monog.*, 84(1), 45-67.
- Chao, A., K.H. Ma & T.C. Hsieh. (2016). iNEXT (iNterpolation and EXTrapolation) Online: Software for interpolation and extrapolation of species diversity. Program and User's guide publicado en http://chao.atat.nthu.edu.tw/worpress/software_download/inext-online/.
- Colectivo Darién. (2021). Trafficking as settler colonialism in eastern Panama: Linking the Americas via illicit commerce, clientelism, and land cover change. *World Dev.* 145, 105490.
- Doan, T.M. (2003). Which methods are the most effective for surveying rain forest herpetofauna? *J. Herpetol.*, 37(1), 72-81.
- Elizondo-Lara, L., Añino, J., Quirós, A., Romaña, S., & Morales, M. (2020). Composition and structure of amphibian communities in two forests in Darién, Panamá. Preprint. <https://www.researchgate.net/publication/342956446>.
- Global Forest Watch. (2014). World Resources Institute. <https://www.globalforestwatch.org>.
- Hedges, B.S., W.E. Duellman & M.P. Heinicke. (2008). New World direct-developing frogs (Anura:Terrarana): molecular phylogeny, classification, biogeography, and conservation. *Zootaxa*, 1737, 1-182.
- Hertz, A., Hauenschild, F., Lotzkat, S., & Köhler, G. (2012). A new golden frog species of the genus *Diasporus* (Amphibia, Eleutherodactylidae) from the Cordillera Central, western Panama. *ZooKeys* 196, 23-46.

- Hocking, D.J. & K.J. Babbitt. (2014). Amphibian contributions to ecosystem services. *Herpetol. Conserv. Biol.*, 9: 1-17.
- Ibáñez, R., C.A. Jaramillo, M. Arrunátegui, Q. Fuenmayor & F.A. Solís. (1995). Inventario biológico del Canal de Panamá. Estudio herpetológico. *Scientia* (Panamá), Número especial 2,107-108.
- IUCN. 2022. The IUCN Red List of Threatened Species. Version 2022-2. <https://www.iucnredlist.org..>
- Kunz, M., H. Barrios, M. Dan, I. Dogirama, F. Gennaretti, M. Guillemette, A. Koller, C. Madsen, G. Lana, A. Ortega, M. Ortega, J. Paripari, D. Piperno, K.F. Reich, T. Simon, S. Solis, P. Solis, J. Valdes, G. von Oheimb, & C. Potvin. (2022). Bacurú Drõa: indigenous forest custody as an effective climate change mitigation option. A case study from Darién, Panama. *Front. Clim.*, 4, 1047832.
- Mateo-Vega, J., Arroyo-Mora, J. P. & Potvin, C. (2019). Tree aboveground biomass and species richness of the mature tropical forests of Darien, Panama, and their role in global climate change mitigation and biodiversity conservation. *Conserv. Sci. Pract.*, 1(8): e42.
- Medina, D., R. Ibáñez, K.R. Lips & A.J. Crawford. (2019). Amphibian diversity in Serranía de Majé, an isolated mountain range in eastern Panamá. *ZooKeys*, 859, 117-130.
- Myers, N., R.A. Mittermeier, C.G. Mittermeier, G.A.B. da Fonseca & J. Kent. (2000). Biodiversity hotspots for conservation priorities. *Nature*, 403, 853-858.
- Racero-Casarrubia, J.A., C.C. Vidal, Ó.D. Ruiz & B.C. Jesús. (2008). Percepción y patrones de uso de la fauna silvestre por las comunidades indígenas Embera-Katíos en la cuenta del río San Jorge, zona amortiguadora del PNN-Paramillo. *Rev. Estud. Soc.*, 31, 118-131.
- Samudio, R. Jr., A. Sosa-Bartuano, R. Samudio, J. Carrión de Samudio & J. Pino. (2015). Riqueza y abundancia de las especies de anfibios en los bosques de Cerro Pirre en el Darién de Panamá. *Tecnociencia*, 17(2), 5-19.

- Scheele, B.C., F. Pasmans, L.F. Skerratt, L. Berger, A.N. Martel, W. Beukema, ... & S. Canessa. (2019). Amphibian fungal panzootic causes catastrophic and ongoing loss of biodiversity. *Science*, 363(6434), 1459-1463.
- Sosa-Bartuano, A., R. Samudio Jr., R. Samudio & J. Carrión de Samudio. (2017). Reporte preliminar sobre la distribución altitudinal de anfibios en Cerro Pirre, Parque Nacional Darién, Panamá. *Tecnociencia*, 19(2): 87-101.
- Springborn, M.R., J.A. Weill, K.R. Lips, R. Ibáñez & A. Ghosh. (2022). Amphibian collapses increased malaria incidence in Central America. *Environ. Res. Lett.*, 17, 104012.
- Stuart, S.N., J.S. Chanson, N.A. Cox, B.E. Young, A.S. Rodrigues, D.L. Fischman & R.W. Waller. (2004). Status and trends of amphibian declines and extinctions worldwide. *Science*, 306 (5702), 1783-1786.
- Underwood, W., R. Anthony, S. Cartner, D. Corey, T. Grandin, C. Greenacre, S. Gwaltney-Brant, M.A. McCrackin, R. Meyer & D. Miller. (2013). AVMA guidelines for the euthanasia of animals: 2013 edition. American Veterinary Medical Association, Schaumburg, IL.
- Whitfield, S.M., K.R. Lips & M.A. Donnelly. (2016). Amphibian decline and conservation in Central America. *Copeia*, 104(2): 351-379.
- Womack, M.C., E. Steigerwald, D. Blackburn, D.C. Cannatella, A. Catenazzi, J. Che, M.S. Koo, J.A. McGuire, S.R. Ron, C. Spencer & V.T. Vredenburg, R.D. Tarvin. (2021). State of the Amphibia 2020: A review of five years of amphibian research and existing resources. *Ichthyol. Herpetol.*, 110(4): 638-661.
- Zipkin, E.F., G.V. DiRenzo, J.M. Ray, S. Rossman & K.R. Lips. (2020). Tropical snake diversity collapses after widespread amphibian loss. *Science*, 367(6479), 814-816.



CARACTERIZACIÓN DE LA ACTIVIDAD DE ANIDACIÓN DE TORTUGAS MARINAS EN PLAYA MORRILLO, VERAGUAS, PANAMÁ.

CHARACTERIZATION OF SEA TURTLE NESTING ACTIVITY AT MORRILLO BEACH, VERAGUAS PROVINCE, PANAMA

Rosa, G. Castellero

Universidad de Panamá, (CCIMBIO-CRUV-UP) Veraguas, Panamá.

rosa-1110@hotmail.com

<https://orcid.org/0000-0002-5184-5287>

Luisa, F. López-Lozano

Sea Turtle Conservancy (STC), Panamá.

luisa.lopez3110@gmail.com

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

Santiago, Jiménez-Arias

Sea Turtle Conservancy (STC), Panamá.

santiago.jimenez.arias1@gmail.com

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

Fecha de recepción: 29 de mayo de 2023

Fecha de aceptación: 5 de octubre de 2023

DOI <https://doi.org/10.48204/j.tecno.v26n1.a4649>

RESUMEN

Con el objetivo de caracterizar la actividad de anidación de tortugas marinas en playa Morrillo, se realizaron monitoreos nocturnos y diurnos desde julio hasta noviembre de 2021. Se registró la siguiente información: número de eventos, número de nidos, tipos de rastros, biometría de los rastros, especies anidantes, datos biométricos de las hembras anidantes, posición de los nidos en el perfil de playa y en los puntos de referencia de la playa y estado de los nidos (saqueados o depredados). Se documentaron 445 eventos, 300 de ellos fueron eventos verdaderos, 224 correspondieron a *L. olivacea*, 45 a *C. mydas*, 10 a *E. imbricata* y 21 nidos no pudieron ser identificados. Se midieron 57 hembras de *L. olivacea* que promediaron un LCC de 65.2 cm y un ACC de 69.5 y 18 de *C. mydas* las cuales registraron un LCC de 74.6 cm y un ACC de 69.6 cm. Además, se determinó que el saqueo y la depredación por perros fueron la principal causa de la pérdida de los nidos. Este estudio permitió resaltar la importancia de playa Morrillo como un sitio clave para la anidación de tortugas marinas en el Pacífico panameño.

PALABRAS CLAVES

Tortugas marinas, playa de anidación, distribución de nidos, saqueo.

ABSTRACT

In order to characterize the nesting activity of sea turtles on Morrillo beach, nocturnal and diurnal monitoring was carried out from July to November 2021. The following information was recorded: number of events, number of nests, types of tracks, biometrics of the tracks, nesting species, biometric data of nesting females, position of nests in the beach profile and reference points of the beach, and the status of the nests (poached or depredated). A total of 445 events were documented, of which 300 were true events. Of these, 224 were attributed to *L. olivacea*, 45 to *C. mydas*, 10 to *E. imbricata*, and 21 nests could not be identified. 57 *L. olivacea* females were measured, with an average CCL of 65.2 cm and an CCW of 69.5 cm, and 18 *C. mydas* females were measured with a CCL of 74.6 cm and an CCW of 69.6 cm. Additionally, it was determined that poaching of eggs and depredation by dogs were the main causes of nest loss. This study highlighted the importance of Morrillo beach as a key site for sea turtle nesting in the Panamanian Pacific.

KEY WORDS

Sea turtles, nesting beach, nest distribution, poaching.

INTRODUCCIÓN

Las tortugas marinas son reptiles adaptados a la vida en entornos acuáticos. Las especies de tortugas marinas se encuentran englobadas bajo la superfamilia Chelonioidea, la cual a su vez consta de dos familias: Dermochelyidae y Cheloniidae. La tortuga laúd (*Dermochelys coriacea*) es la única representante de la primera familia Dermochelyidae (Ministerio de Ambiente de Panamá, 2017). La segunda familia está compuesta por seis especies: la tortuga kempí (*Lepidochelys kempii*), plana (*Natator depressus*), carey (*Eretmochelys imbricata*), cabezona (*Caretta caretta*), verde (*Chelonia mydas*) y lora (*Lepidochelys olivacea*) (Chacón & Passapera, 2004). Las últimas cuatro especies mencionadas se encuentran en las costas y/o las aguas del Pacífico panameño (ANAM, 1999).

Estos animales son un recurso valioso e indispensable de la biodiversidad marina y se encuentran ampliamente distribuidos en todas las cuencas oceánicas. Al ser organismos altamente migratorios, interactúan de manera directa con otras especies dentro de los diversos ecosistemas que intervienen (Buitrago, 2003). Además, son especies clave para la transferencia de energía entre las zonas marino-costeras, ya que aportan materia

orgánica al suelo costero pobre en nutrientes por medio de los huevos depositados (Ministerio de Ambiente de Panamá, 2017).

Las diferentes especies de tortugas están adaptadas a diferentes nichos y su presencia en cada hábitat es un indicador del buen estado del ecosistema (León & Bjorndal, 2002). La reducción de las poblaciones de tortugas marinas puede llegar a crear un desequilibrio en los ecosistemas marino-costeros, afectando todos los niveles de la cadena trófica debido a la importancia ecológica que representan (Patiño *et al.*, 2012).

El proceso de anidación es un aspecto clave en el ciclo de vida de las tortugas marinas (Rubiano, 2011). Luego de alcanzar la madurez sexual y de haberse apareado, las tortugas se desplazan a las playas para iniciar la temporada de anidación, durante la cual pueden anidar tres o más veces dependiendo de la especie, fenómeno denominado como reanidación (Chacón *et al.*, 2008). En el Pacífico panameño dicha temporada para *L. olivacea* se desarrolla durante los meses de julio a diciembre (Rodríguez & Contreras, 2020), para *E. imbricata* de junio a octubre (Ministerio de Ambiente de Panamá, 2017) y para *C. mydas* de junio a enero (Lombardo & Saavedra, 2023).

La anidación suele ocurrir durante la noche e inicia cuando la hembra fecundada sale del mar y se dirige a la playa (Márquez, 1996). Luego de cruzar la línea de marea alta, busca el lugar ideal para hacer el nido. Allí la hembra utiliza sus aletas anteriores para limpiar el área y forma una fosa poco profunda o “cama” en la arena para acomodar el cuerpo. Con sus aletas posteriores cava un hueco llamado cámara de incubación en el cual empieza a desovar (Chacón *et al.*, 2008). Al finalizar la puesta, la hembra cubre los huevos con arena y camufla el nido haciendo un movimiento de “limpiaparabrisas” con sus aletas anteriores y finalmente regresa al mar (Bennett, 2018).

Las playas de anidación son zonas en donde las tortugas pasan relativamente un corto tiempo, pero es un momento de fácil encuentro con humanos, por lo que las hembras anidantes, los neonatos y los huevos son extremadamente vulnerables en su paso por las playas (Eckert & Grobois, 2001). En estas zonas es común encontrar la captura ilegal de hembras y/o el saqueo de los nidos, amenazas que son devastadoras para sus poblaciones (Rincón & Rodríguez, 2004). Adicionalmente, amenazas antropogénicas indirectas como el cambio climático y las alteraciones del paisaje están modificando la costa, aumentando el nivel del mar, erosionando las costas e inundando las playas, lo cual conlleva a la degradación y destrucción de los hábitats de anidación (Llamas *et al.*, 2017). Como consecuencia de éstas y diversas amenazas más, seis de las siete especies se encuentran bajo alguna categoría de peligro de extinción de la Lista Roja

de Especies Amenazadas de la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (UICN) (IUCN-SSC, s.f.).

Para Panamá, se cuenta con información de estudios previos en playas de anidación del Pacífico. En Mata Oscura, provincia de Veraguas, se realizó una caracterización física y biológica de la playa, y se evaluó el éxito de incubación en vivero de tortuga lora (*L. olivacea*) (González, 2013; Royo, 2014). Por otro lado, en la provincia de Los Santos, González (2014) realizó una descripción biométrica de las especies de tortugas marinas en playas de anidación de Cambutal. Mientras que, Garcés *et al.* (2020) y Lombardo & Saavedra (2023) caracterizaron los sitios de anidación de tortugas marinas y describieron las características de la anidación de tortuga lora y verde en playa Lagarto, Pedasí.

Para fortalecer la base de datos de tortugas marinas en el Pacífico panameño y establecer una línea base en playa Morrillo, provincia de Veraguas, se caracterizó la actividad de anidación de tortugas marinas en playa Morrillo durante la temporada julio-noviembre de 2021.

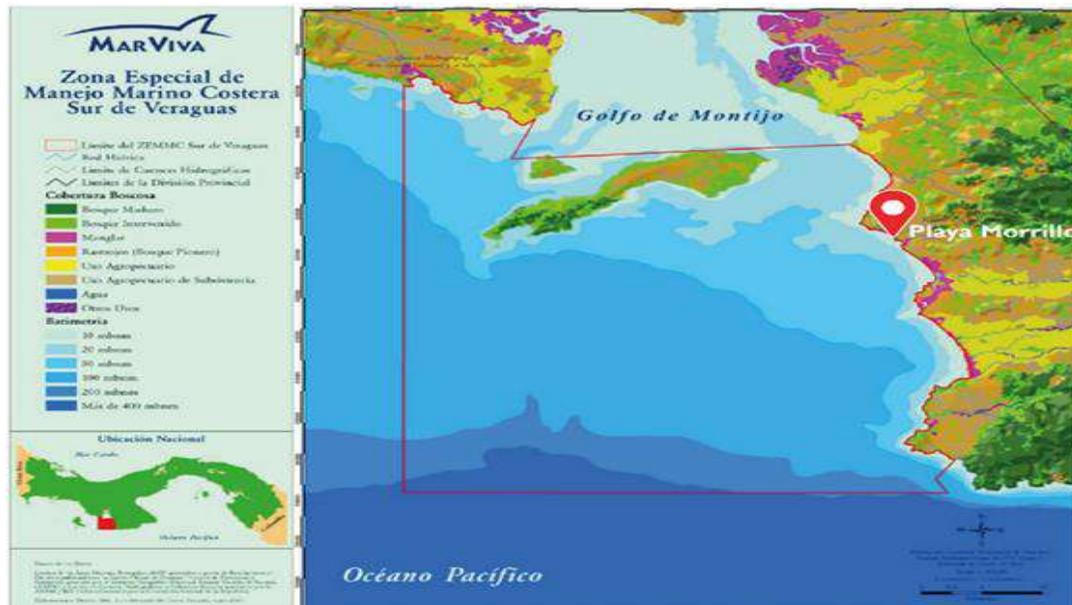
MATERIAL Y MÉTODOS

Área de estudio

Playa Morrillo se ubica entre los 7° 29' 33" latitud Norte y 80° 57' 30" longitud Oeste. Forma parte de la Zona Especial de Manejo Marino-Costera (ZEMMC) la Zona Sur de Veraguas, distrito de Mariato, provincia de Veraguas y del área de influencia del Parque Nacional Coiba (PNC) (Pinto & Yee, 2011). Al norte limita con playa La Barra, al sur con playa Mata Oscura, al este con áreas ganaderas y residencias de la comunidad local, y al oeste con el océano Pacífico (Figura 1).

Figura 1.

Localización de playa Morrillo. Fuente: Pinto & Yee (2011)



El área de estudio posee una extensión aproximada de 2.2 km, se caracteriza por presentar formaciones rocosas en el extremo noroeste y en la desembocadura del estero Morrillo en su extremo suroeste. Es una playa con fuertes oleajes, lo que provoca cambios constantes en la dinámica de esta. Además, cuenta con ecosistemas de manglares los cuales se encuentran paralelos a la playa.

Monitoreo

De julio a noviembre de 2021 se realizaron monitoreos nocturnos y diurnos en playa Morrillo, con el fin de describir la actividad de anidación de las tortugas marinas. El monitoreo nocturno se llevó a cabo aleatoriamente a distintas horas de la noche dependiendo de la marea, evitando salir en marea alta puesto que era peligroso recorrer ciertas zonas de la playa. Éste tuvo una duración entre 3 y 6 horas, durante las cuales se abarcó toda la extensión de la playa, tomando un descanso de 30 minutos en cada extremo para ampliarla ventana de un posible encuentro con las tortugas. Los monitoreos diurnos fueron realizados en la madrugada con el objetivo de verificar los datos tomados en la noche y registrar rastros que pudieran ocurrir después del monitoreo nocturno.

Cuando solo se encontró el rastro se utilizó la huella para identificar la especie siguiendo la guía descrita por Eckert *et al.* (2000) y se midió el ancho del rastro tres veces para obtener un valor promedio. Todos los rastros encontrados fueron enumerados como eventos y cada tipo de rastro se catalogó dependiendo del esfuerzo de anidación en: verdadero, falso o arrastre. Cuando el rastro presentó una considerable perturbación en la arena producto de la construcción de la cama y el nido, se catalogó como un rastro verdadero. El rastro falso se identificó por un esfuerzo de anidación inconcluso. Mientras que, el arrastre en forma de U indicó que la tortuga solamente salió a la playa y regresó al mar sin ningún intento de anidación (Eckert *et al.*, 2000).

En los casos donde se encontró a la tortuga anidando se identificó la especie utilizando la guía de Eckert *et al.* (2000). Se tomaron medidas del ancho curvo del caparazón (ACC) y el largo curvo del caparazón (LCC) una vez la tortuga había terminado su proceso de anidación (Chacón & Passapera, 2004). Adicionalmente, se observó si la hembra tenía en sus aletas anteriores alguna identificación, y en caso de no tenerla, se le colocó una placa metálica de aleación tipo Inconel en la segunda escama de la aleta izquierda con el fin de identificar a cada individuo y observar posibles reanidaciones. Asimismo, se anotó la ubicación de los nidos en el perfil de playa (parte baja, media y alta), el estado de los nidos (saqueados o depredados), la fase lunar y la posición de los nidos en los puntos de referencia.

Por otro lado, se establecieron 11 puntos de referencia (A-K) perpendiculares a la línea de la costa separados cada 200 m, en los cuales se midió el perfil de playa (ancho, pendiente) durante la marea baja siguiendo el método Emery (1961). Esta sectorización de la playa permitió manejar los datos en una escala más detallada, para determinar la distribución y analizar la tendencia espacial de la actividad de anidación (Chacón *et al.*, 2008).

Análisis estadístico

Dado que no se cumplieron los supuestos de normalidad y homocedasticidad se utilizó la prueba de Kruskal-Wallis para analizar las diferencias en el número de nidos durante la temporada y en el número de nidos a lo largo de los puntos de referencia. Se aplicó la prueba de U de Mann-Whitney para determinar la variación de la proporción de los nidos en el perfil de playa. Finalmente, se realizó la prueba de correlación por rangos de Spearman (r_s) para determinar si la anidación estaba asociada con las fases lunares. Estos análisis se realizaron con el programa IBM SPSS Statistics.

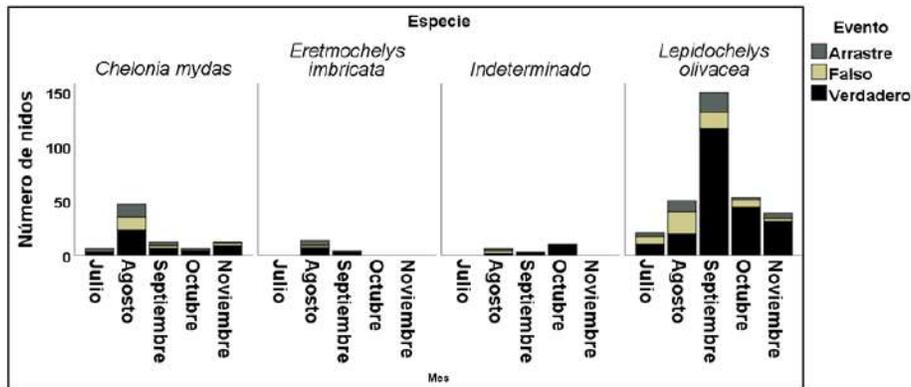
RESULTADOS

Se registraron 445 eventos, teniendo en cuenta todos los rastros (verdaderos, falsos y arrastres). Se observó la presencia de dos tortugas marinas: *Lepidochelys olivacea* con 315 eventos y *Chelonia mydas* con 83 eventos. También, se registraron 18 eventos de *Eretmochelys imbricata*, los cuales fueron identificados por las diferencias en el rastro y el tamaño de los huevos, puesto que ninguna hembra anidante fue encontrada. Además, 29 eventos fueron clasificados como indeterminados, ya que los nidos fueron encontrados en el monitoreo diurno y la marea ya había borrado los rastros.

De los 445 eventos, 300 (67.4%) fueron catalogados como verdaderos, es decir, nidos efectivos, 77 (17.3%) fueron eventos falsos y 68 (15.3%) fueron arrastres. En la Figura 2 se puede observar que *L. olivacea* tuvo un mayor número de arrastres y eventos falsos. Por otra parte, agosto fue el mes con más eventos falsos. Para todos los eventos registrados se determinó el ancho promedio de los rastros de cada especie: para *C. mydas* fue de 75.0 ± 9.4 cm (55.3-94.6 cm), el de *L. olivacea* fue de 66.6 ± 5.6 cm (51.6-89.3cm) y el de *E. imbricata* fue de 72.2 ± 5.7 cm (59.6-79.3 cm).

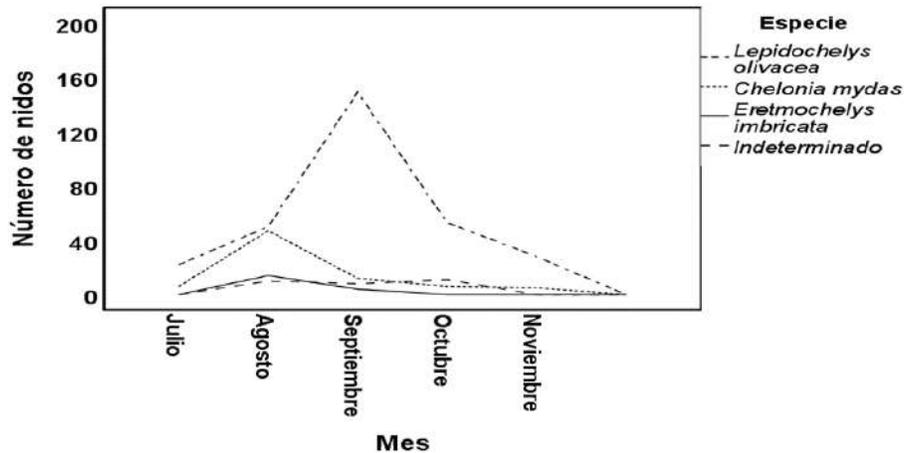
Figura 2.

Número de eventos reportados por especie



De los 300 nidos encontrados, 224 correspondieron a *L. olivacea*, 45 a *C. mydas*, 10 a *E. imbricata* y 21 nidos no pudieron ser identificados. Se determinó diferencia en la actividad de anidación a lo largo de la temporada ($H=51.19$, $p=0.000$), durante la cual *L. olivacea* presentó un pico de anidación en septiembre, *C. mydas* en agosto, mientras que, *E. imbricata* anidó solamente durante agosto y septiembre, teniendo más puestas en agosto (Figura 3). El mayor número de nidos (70.7%) fue localizado durante bajamar.

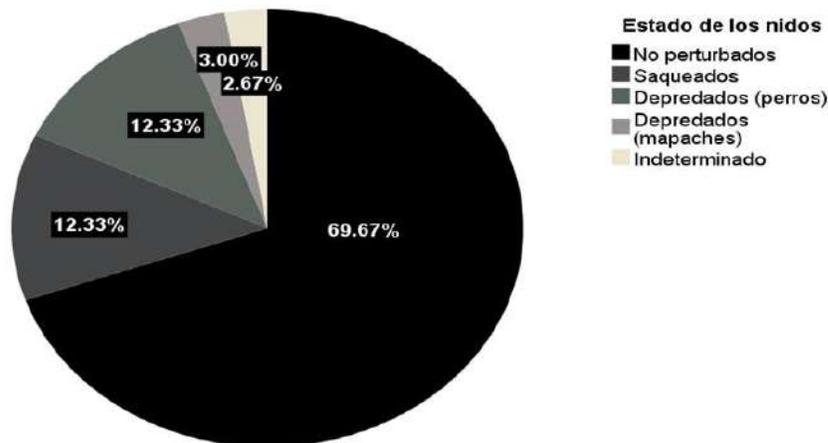
Figura 3.
Número de nidos por especie



Se midieron 78 hembras anidantes, de las cuales 60 correspondieron a *L. olivacea* y 18 a *C. mydas*, y se registraron dos reanidaciones de tortuga lora. El LCC para *L. olivacea* fue de 65.2 ± 3.5 cm (53.0-72.0 cm) y el ACC de 69.5 ± 3.2 cm (59.0-79.0 cm). Para *C. mydas* el LCC fue de 74.6 ± 6.5 cm (68.0-88.0 cm) y el ACC de 69.6 ± 5.9 cm (65.0-80.0 cm). El éxito de anidación de las 60 tortugas de *L. olivacea* marcadas fue de 83.3 %, mientras que, el de *C. mydas* fue de 61.1 %. Por otro lado, se observó que algunas tortugas cuando se encontraron con obstáculos físicos (troncos, basura, raíces de palmas, bermas) hicieron rastros falsos, algunas solo hicieron arrastres, otras en cambio reiniciaron la actividad en otro sitio de la playa.

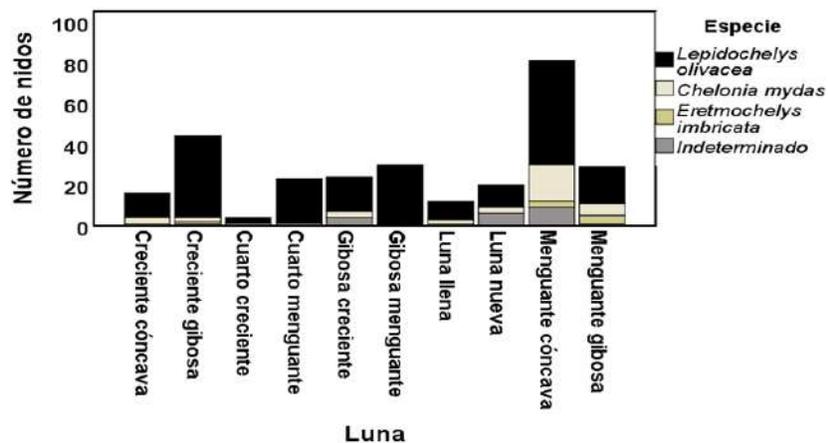
Se registró una pérdida del 30.3 % del total de nidos localizados. La amenaza antropogénica directa más frecuente fue el saqueo de los nidos por parte de los “hueveros”, extrayendo el 12.3 % de los nidos localizados. La segunda amenaza indirecta identificada fue la depredación por parte de los perros, afectando al 12.3 % de los nidos, seguido de los mapaches con 3%. No se pudo identificar las causas de la pérdida de otro 2.7 % de los nidos (Figura 4). Además, se observó que la cantidad de nidos saqueados disminuyó a lo largo de la temporada, siendo agosto el mes con más nidos saqueados (14), seguido de septiembre (13), octubre (7) y noviembre (3). Cabe mencionar que a finales de octubre una tortuga lora fue encontrada muerta en la playa, asesinada por humanos y con el plastrón abierto para la extracción de sus huevos.

Figura 4.
Estados de los nidos



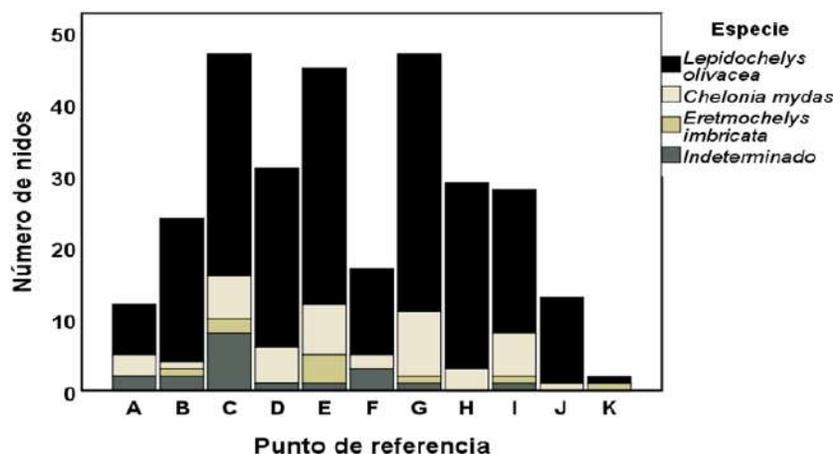
Por otro lado, se identificó si la cantidad de nidos de cada especie varió de acuerdo con la fase lunar. Las tortugas mostraron preferencia para anidar durante las fases creciente gibosa, menguante gibosa y menguante cóncava. La mayoría de los nidos de *L. olivacea* se presentaron durante dichas fases, mientras que *C. mydas* presentó mayor anidación durante la fase menguante cóncava y *E. imbricata* durante la gibosa menguante (Figura 5). Sin embargo, la prueba de correlación de Spearman indicó que no hubo asociación entre el número de nidos y las fases lunares ($r_s = -0.104$, $p = 0.072$).

Figura 5.
Número de nidos puestos durante las diferentes fases lunares



Se encontró una diferencia significativa en la proporción de nidos distribuidos en el perfil de la playa ($Z = -8.85$ $p = 0.000$), ya que las especies utilizaron principalmente la parte alta de la playa como zona de anidación, con una ocurrencia de 271 nidos (90.3 %). Cabe señalar que *C. mydas* y *E. imbricata* prefirieron zonas altas de la playa con presencia de vegetación para llevar a cabo el proceso de anidación, mientras que *L. olivacea* prefirió zonas abiertas sin vegetación y fue la única especie que anidó en media playa con 29 nidos (9.7 %). Por otra parte, la anidación para las tres especies varió a lo largo de los puntos de referencia ($H = 24.23$, $p = 0.007$). *L. olivacea* anidó con mayor frecuencia en los puntos C, E y G, mientras que *C. mydas* lo hizo en los puntos E y G, y *E. imbricata* en el punto E. Los puntos A y K que corresponden a los extremos de la playa presentaron un menor número de anidaciones (Figura 6).

Figura 6.
Distribución de los nidos en los puntos de referencia



A partir de las mediciones tomadas, se estandarizaron en la Tabla 1 los aspectos geomorfológicos de cada punto de referencia. La playa tiene un ancho promedio de 88.9 ± 44.0 m, una elevación promedio de 0.2 ± 0.07 m y una pendiente promedio de $3.1 \pm 1.2^\circ$. Es importante señalar que a lo largo del estudio se observó la formación de paredes de erosión (bermas) de más de un metro de altura en algunas zonas de la playa, asociado principalmente con los periodos de aguaje.

Tabla 1.*Perfil de playa de los 11 puntos de referencia*

Punto de referencia	Ancho (m)	Pendiente (%)	Pendiente (°)
A	53	7.7	4.4
B	58	8.0	4.6
C	53	8.8	5.0
D	78	5.8	3.3
E	68	6.1	3.5
F	83	4.3	2.5
G	93	4.4	2.5
H	73	4.4	2.5
I	83	5.2	2.9
J	133	3.7	2.1
K	203	1.3	0.7

DISCUSIÓN

Las tres especies de tortugas registradas en esta playa coinciden con las especies reportadas en playa Malena y Mata Oscura, las cuales también forman parte de la ZEMMC la Zona Sur de Veraguas (Ministerio de Ambiente de Panamá, 2017). Históricamente en Morrillo los pobladores reportaron la presencia de cuatro especies de tortugas: *Lepidochelys olivacea* (tortuga lora), *Chelonia mydas* (tortuga verde), *Eretmochelys imbricata* (tortuga carey) y *Dermochelys coriacea* (tortuga canal). En la década de los 90 la tortuga más abundante en esta playa era la tortuga carey, sin embargo, la constante presión sobre ésta por su caparazón contribuyó a que su población disminuyera (M. Vásquez, comunicación personal). Es probable que las hembras de tortuga carey que utilizan el Parque Nacional Coiba (PNC) como área clave para el forrajeo y el desarrollo son las que anidan en playa Morrillo, ya que de acuerdo con el Ministerio de Ambiente de Panamá (2019), la tortuga carey utiliza las playas que se encuentran dentro del área de influencia del PNC para anidar, a la cual pertenece playa Morrillo.

En la actualidad la tortuga lora es la especie con mayor número de anidaciones en playa Morrillo, tal y como lo reportan Lombardo & Saavedra (2023) para playa Lagarto. La tortuga lora es la especie más abundante, ya que es la única que presenta dos tipos de anidaciones: arribadas y solitarias, esta última es la más común (Eckert & Grobois,

2001). Cabe señalar que, la utilización de estas estrategias reproductivas está en función de las condiciones ambientales (Beange *et al.*, 2015).

Los eventos falsos y arrastres reportados en playa Morrillo se atribuyeron en gran medida a la presencia de obstáculos en la playa (truncos, raíces, basura, berma), puesto que se encontraron cámaras de incubación vacías que tenían raíces de palma, lo cual fue un impedimento para que la tortuga finalizara su proceso de anidación. También, la presencia de basura y troncos en la playa redujo el área de anidación para las tortugas marinas, mientras que la formación de bermas obstaculiza el ingreso a las áreas de anidación, puesto que se encontraron arrastres frente a las bermas. Otro factor es el tipo de sustrato, ya que se localizaron intentos de cámaras en zonas con presencia de piedras. Para Amorochó *et al.* (2015) la excesiva acumulación de madera de deriva dificulta la selección de sitios adecuados para la ovoposición e incubación de los nidos y aumenta el riesgo de mortalidad de huevos y neonatos durante la temporada reproductiva. Además, mencionan que las palmas de coco invaden severamente las áreas disponibles para el desove de tortugas. Por su parte, Lombardo & Saavedra (2023) señalan que posiblemente la formación de bermas frente a la playa también influye en el éxito de la anidación.

El número de nidos registrados en playa Morrillo (300) fue mayor que el reportado en Mata Oscura para el mismo año con 221 nidos (J. Rodríguez, comunicación personal), pero menor que el de playa Malena con 402 nidos (A. González, comunicación personal). Cabe señalar que playa Malena cuenta con un proyecto de conservación de tortugas marinas desde el 2002 y en los últimos años el número de tortugas se ha incrementado por la protección de los nidos dentro de un vivero, lo que ha aumentado el éxito de supervivencia de los neonatos. Las tortugas marinas toman en cuenta varios factores para la selección de playas de anidación, entre ellos: área disponible para el desove, la pendiente, contenido orgánico, humedad de la arena y tipo de grano (Rincón & Rodríguez, 2004; Piedra & Morales, 2015; Garcés *et al.*, 2020). Por lo que las diferencias en las características físicas de las playas pueden incidir en la diferencia en el número de nidos entre estas playas.

L. olivacea presentó un pico de anidación en septiembre, esto coincide con lo reportado por Brenes *et al.* (2014) en playa Tortuga, Costa Rica. Mientras que el pico de anidación de *C. mydas* fue en agosto. Cabe señalar que agosto y septiembre corresponden a meses de la época lluviosa, siendo septiembre uno de los meses de mayor precipitación en la vertiente del Pacífico panameño (ETESA, 2020). De acuerdo con Guzmán (2005), las tortugas prefieren anidar durante la época lluviosa, porque la humedad de la arena facilita la construcción de la cámara de incubación.

Aunque *C. mydas* en playa Morrillo presentó una mayor anidación durante la fase menguante cóncava, lo descrito por Ekanayake *et al.* (2002) en Sri Lanka, también concluye que no hay ninguna correlación entre la fase lunar y la actividad de anidación de la tortuga verde. Para *E. imbricata* la mayor actividad de anidación tuvo lugar durante la fase gibosa menguante, lo cual fue descrito por Nakamura *et al.* (2019) en Brasil, quienes también encontraron una relación con la dicha fase, sin embargo, también encontraron una correlación no significativa estadísticamente.

Respecto a *L. olivacea*, la mayoría de los nidos fueron registrados durante las fases creciente gibosa, menguante gibosa y menguante cóncava. Aunque en este estudio no se encontró una correlación, Hughes & Richard (1974) demuestran un patrón de anidación que se ve influenciado por la fase lunar. Asimismo, James & Melero (2016) indican que la mayor intensidad de anidación ocurre después de la luna nueva y después de la llena, mientras que Espinoza *et al.* (2021) describe que los arribos suceden estando la luna en cuarto menguante. Pese a que en diferentes lugares se ha documentado una relación entre actividad de anidación de la lora y las fases lunares, no existe una correlación directa. Sin embargo, en playa Morrillo sí se observa una preferencia de *L. olivacea* por anidar cuando la luna está en fases intermedias.

La mayor amenaza antrópica directa que se registró para la supervivencia de los nidos de tortugas marinas fue el saqueo, que afectó al 12.3% de los nidos ubicados. Pese a que este porcentaje es elevado, el saqueo de nidos de tortuga en playa Morrillo es menor que el de playa Lagarto, en Pedasí, donde un 68% de los nidos de la temporada fueron saqueados (Garcés *et al.*, 2020). Los nidos son saqueados por “hueveros”, estos son personas generalmente pertenecientes a la comunidad local que extraen dichos huevos para su consumo o venta. Durante el tiempo del estudio, se observó que la presencia de investigadores en la playa y su contacto con la comunidad local supuso una disminución en el saqueo, ya que cuando los hueveros veían a los investigadores en la playa abandonaban su actividad y se retiraban del lugar.

El consumo de huevos se practica por una cuestión de tradición familiar, potenciado por la facilidad en la obtención de huevos de tortuga. Además, está muy extendida en la comunidad la creencia de que los huevos tienen un efecto afrodisíaco, lo cual impulsa su consumo. El saqueo se extiende a una gran parte de los países de Hispanoamérica.

Por ejemplo, en la localidad de Puerto Arista, en México, más de la mitad de los pescadores entrevistados saquean nidos de *L. olivacea* para su venta o consumo y algunos otros capturan hembras anidantes para la venta de su carne a restaurantes locales. Además, la mayoría de los habitantes del municipio que fueron entrevistados compran y consumen huevos de esta especie (Ortiz, 2022).

La mayor amenaza indirecta identificada fue la depredación por parte de los perros, lo cual afectó el 12.3 % de los nidos. Este porcentaje es bajo en comparación con lo que reporta Barquero (2013) el cual fue de 39%, también Korein *et al.* (2019) señala que los perros fueron los principales depredadores de nidos de tortugas. Esta amenaza está muy ligada con la acción humana, ya que la mayoría de los perros que depredan nidos de tortuga pertenecen a gente de la comunidad. Los perros domésticos son una amenaza considerable para las tortugas y sus nidos, debido a su capacidad para expandirse y la ausencia de depredadores que los amenacen (Nayelli *et al.*, 2022).

La zona que elige la hembra anidante para ubicar sus nidos es muy importante, ya que esto influye directamente en la supervivencia de su descendencia (Ficetola, 2007). De acuerdo con lo observado durante el estudio, la selección del sitio depende del área disponible, la cobertura vegetal, el proceso de erosión y la formación de bermas. Estas características a su vez inciden en la distribución de los nidos el cual varía dependiendo de la especie. Este estudio indicó que la tortuga lora generalmente hace sus nidos en la zona alta y descubierta de la playa, cerca del borde de la vegetación. Dicha preferencia por anidar en áreas libres de vegetación ha sido descrita anteriormente para esta especie en el Pacífico mexicano (Mejía, 2020; Rojas *et al.*, 2016;) y en el Pacífico colombiano (Hinestroza & Páez, 2001; Martínez & Páez, 2000; Parada, 2018). También, esta especie fue la única que utilizó la zona media para anidar, lo cual fue encontrado en Playa Lagarto, Panamá por Garcés *et al.* (2020) y Lombardo & Saavedra (2023), quienes describen que *L. olivacea* prefiere utilizar esta zona para la anidación. Aunque la tortuga lora suele preferir los sitios más alejados de la línea de marea alta, el 9.7% de los nidos ubicados en la zona media fueron colocados bajo la berma formada por la erosión, lo cual pudo haber afectado negativamente a los nidos.

La tortuga verde también utiliza la zona alta de la playa para la anidación, sin embargo, a diferencia de la lora, buscan principalmente la vegetación y anidan bajo la sombra de los árboles. Esto concuerda con lo que registra Santidrián *et al.* (2015) en playa Cabuyal, Costa Rica para la población de *C. mydas* del Pacífico oriental tropical. Del mismo modo, la tortuga carey prefiere zonas altas con cobertura vegetal, tal y como lo reportan Ficetola (2007); Kamel (2013); Kamel & Mrosovsky (2005). Este comportamiento puede estar ocasionando que los nidos ubicados en la vegetación

tengan mayor probabilidad de sobrevivir, puesto que la vegetación cumple un importante papel mitigando los efectos de la erosión (Fish *et al.*, 2005; Santidrián *et al.*, 2015). Asimismo, al encontrarse bajo la sombra de los árboles, puede contribuir a que se desarrollen en condiciones óptimas, como bajas temperaturas de incubación, lo que tiene una correlación directa con la producción de machos (Kamel, 2013).

Con respecto a las diferencias encontradas en la anidación a lo largo de los puntos de referencia, se puede destacar que el menor número de nidos ubicados en los puntos A y K se debe principalmente a aspectos morfológicos de dichas zonas. El punto de referencia A presenta grandes formaciones rocosas que dificultan el acceso de las tortugas a la playa y el punto de referencia K se encuentra cerca del estero, el cual cambia frecuentemente su curso, inundando y modificando el área disponible para la anidación. Asimismo, ésta es la sección más extensa de la playa.

Los puntos de referencia que presentaron mayor número de anidación fueron el C, E y G. Es posible que esto se deba a que la formación de bermas fue menos frecuente en dichos puntos, facilitando el acceso a la zona alta de la playa. La anidación de lora fue mayor en esos puntos, los cuales presentaron pendientes entre dos y cinco grados y menores anchuras. Mejía (2020); Parada (2016); Rojas *et al.* (2016) describieron que *L. olivacea* suele frecuentar zonas de poca pendiente, cerca de cinco grados y que suele anidar en zonas de mayor anchura. Lo que sugiere que además de la pendiente y del ancho de la zona de la playa, son otros factores los que intervienen en la elección del sitio de anidación.

Asimismo, Ficetola (2007) describe que la tortuga carey también prefiere las zonas con poca pendiente para anidar, lo que se ve reflejado en el mayor número de nidos en el punto E con una pendiente de 3.52° y utiliza zonas con poca cobertura rocosa, lo cual explica su ausencia en el punto A. Por otro lado, la tortuga verde al ser la especie de caparazón duro más grande requiere de zonas con pendientes moderadas, cortas distancias entre la zona intermareal y la supralitoral, que no presenten grandes obstáculos físicos y de fácil acceso a las zonas altas (Cuevas *et al.*, 2010; Zavaleta & Morales, 2013). Dichas características fueron reportadas para los puntos de referencia con mayor anidación de *C. mydas*, sin embargo, los puntos E y G donde se reportaron mayores anidaciones de tortuga verde presentaron pendientes moderadas, pero mayor anchura. Bellini *et al.* (1996) señalan que, la tortuga verde suele salir a anidar cerca de la marea alta, disminuyendo así la distancia que debe recorrer en la playa para llegar a la cobertura vegetal y evitar quedarse varada en las aguas de mareas más bajas. Es posible que ésta sea la estrategia utilizada por *C. mydas* en playa Morrillo.

CONCLUSIONES

Playa Morrillo representa un sitio importante para la anidación de tortugas marinas, ya que cuenta con tres de las cinco especies reportadas para Panamá, siendo *L. olivacea* la que presenta el mayor número de anidaciones. Las tres especies registradas muestran preferencias por anidar en la parte alta de la playa, y en zonas con mayor pendiente

para *L. olivacea*, pendiente moderada para *C. mydas* y menor pendiente para *E. imbricata*. Se reporta la pérdida del 30.3 % del total de nidos identificados durante el estudio, siendo el saqueo y la depredación por perros las principales causas. Se sugiere realizar una futura investigación que evalúe el éxito de eclosión y la pérdida de nidos por el proceso de erosión, el cual fue visto a lo largo del estudio. También, es importante que las condiciones naturales de cobertura vegetal y disponibilidad de zonas abiertas sin obstáculos se mantengan en playa Morrillo para asegurar la anidación.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece el apoyo financiero de la Secretaría Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación (SENACYT), y a los revisores por su contribución al artículo.

REFERENCIAS

- Amorocho, D., J. A. Rodríguez-Zuluaga, L. F. Payán, L. A. Zapata & P. A. Rojas. (2015). Plan de manejo de las tortugas marinas del Parque Nacional Natural Gorgona. Cali: WWF Colombia y Parques Nacionales Naturales.
- ANAM. (1999). Informe Nacional. Autoridad Nacional del Ambiente, Panamá. http://www.cites.org/common/prog/hbt/country_report/Panam a.pdf.
- Barquero-Edge, P. (2013). Trends in marine turtle nesting and egg predation on the Osa Peninsula, Costa Rica. *Marine Turtle Newsletter*, 138, 7-10.
- Beange, M., Cliff, A., & Araúz, R. (2015). Reporte: Proyectos de Conservación de playas de anidación de tortugas marinas en el sureste de la península de Nicoya. CREMA. San José, Costa Rica.
- Bellini, C., Marcovaldi, M. A., Sánchez, T. M., Grossman, A., & Sales, G. (1996). Atol das Rocas biological reserve: second largest *Chelonia* rookery in Brazil. *Marine Turtle Newsletter*, 72, 1-2.
- Bennett, L. 2018. Sea Turtles, Cheloniidae and Dermatochelyidae. Ocean, find your blue. Smithsonian Ocean. <https://ocean.si.edu/ocean-life/reptiles/sea-turtles>.
- Brenes-Arias, O., Bonilla-Bonilla, L., Bonilla-Salazar, A., & Vega-Delgado, 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. *Rev. Biol. Trop.*, 63(1), 339-349.

- Buitrago, J. (2003). El rol de las tortugas marinas en los ecosistemas. Venezuela: Estación de Investigaciones Marinas de Margarita, Fundación La Salle de Ciencias Naturales.
- Chacón, D. & Passapera, E. (2004). Informe de la Anidación de la tortuga carey (*Eretmochelys imbricata*) en el Parque Nacional Cahuita, Limón, Costa Rica. Proyecto para la Conservación de las Tortugas Marinas en el Caribe Sur, Asociación ANAI, Talamanca, Costa Rica.
- 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.
- Cuevas, E., Liceaga-Correa, M. de los Ángeles, & Mariño-Tapia, I. (2010). Influence of beach slope and width on hawksbill (*Eretmochelys imbricata*) and green turtle (*Chelonia mydas*) nesting activity in El Cuyo, Yucatán, México. *Chelonian Conservation and Biology*, 9(2), 262-267.
- Eckert, K. L., K. A. Bjorndal, F. A. Abreu-Grobois & M. Donnelly. 2000. Técnicas de Investigación y Manejo para la Conservación de las Tortugas Marinas. (Traducción al español). Grupo Especialista en Tortugas Marinas UICN/CSE. Publicación No. 4.
- Eckert, K. L., & Abreu-Grobois, F. A. (2001). Mitigación de las amenazas en playas de anidación. Conservación de tortugas marinas en la Región del Gran Caribe: Un Diálogo para el manejo regional efectivo, 126.
- Ekanayake, E. L., Ranawana, K. B., Kapurusinghe, T., Premakumara, M. G., & Saman, M. M. (2002). Impact of lunar cycle on nesting behaviour of marine turtles. *Ceylon Journal of Science (Biological Science)*, 30, 99-104.
- Emery, K. (1961). A Simple Method of Measuring Beach Profiles. *Limnology and Oceanography*, 6, 90-93.
- Espinoza Mora, N., Orrego, C. M., & Alfaro Alvarado, L. D. (2021). Estimación del área y el número máximo de turistas para observar la anidación de tortugas marinas protegidas. *Ecología Austral*, 31(2), 289–300.

- Empresa de Transmisión Eléctrica, S.A (ETESA). (2020). Pronóstico de precipitación para los meses de agosto, septiembre y octubre del año 2020 y monitoreo de los fenómenos de variabilidad.
- Ficetola, G. (2007). The influence of beach features on nesting of the hawksbill turtle *Eretmochelys imbricata* in the Arabian Gulf. *Oryx*, 41(3), 402-405.
- Fish, M.R., Cote, I. M., Gill, J. A., Jones, A. P., & Renshoff, S. (2005). Predicting the impact of sea-level rise on Caribbean Sea turtle nesting habitat. *Biol. Conserv.*, 19, 482–491.
- 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.
- González, A. (2013). Caracterización física y biológica de la playa de anidación de tortugas marinas de Mata Oscura, Veraguas, Panamá. Tesis de licenciatura. Facultad de Ciencias del Mar. Panamá: Universidad Marítima Internacional de Panamá, Panamá.
- González, L. (2014). Descripción y biometría de las especies de tortugas marinas en playas de anidación de Cambutal, Los Santos Panamá. Tesis de licenciatura. Facultad de Ciencias del Mar. Universidad Marítima Internacional de Panamá, Panamá.
- Guzmán-Maldonado, A. (2005). Ecología de anidación de la tortuga marina *Chelonia mydas*, Tortuguero, Costa Rica. Tesis de licenciatura. Universidad de Los Andes, Bogotá, Colombia.
- Hinestroza, L., & Páez, V. P. (2001). Anidación y manejo de la tortuga golfina (*Lepidochelys olivacea*) en la playa La Cueva, Bahía Solano, Chocó, Colombia. *Cuadernos de Herpetología*, 14(2), 131-144.
- Hughes, D.A. & Richard, J. D. (1974). The nesting of the Pacific ridley turtle *Lepidochelys olivacea* on Playa Nancite, Costa Rica. *Marine Biology*, 24, 97–107.
- IUCN-SSC Marine Turtle Specialist Group (s.f.). About Marine Turtles. <https://iucn-mtsg.org/about-turtles/>.

- James, R., & Melero, D. (2016). Nesting and conservation of the Olive Ridley sea turtle (*Lepidochelys olivacea*) in playa Drake, Osa Peninsula, Costa Rica (2006-2012). *Revista Biología Tropical*, 63(1), 117–129.
- Kamel, S. J. (2013). Vegetation cover predicts temperature in nests of the hawksbill sea turtle: implications for beach management and offspring sex ratios. *Endangered Species Research*, 20(1), 41-48.
- Kamel, S. J. & Mrosovsky, N. (2005). Repeatability of nesting preferences in the hawksbill sea turtle, *Eretmochelys imbricata*, and their fitness consequences. *Animal Behaviour*, 70: 819-828.
- Korein, E., Caballol, A., Lovell, P., Exley, L., Marin, C. P., Carillo, J., & Stokes, L. (2019). Using bamboo nest covers to prevent predation on sea turtle eggs. *Marine Turtle Newsletter*, (156), 33-37.
- León, Y. M. & Bjorndal, K. A. (2002). Selective feeding in the hawksbill turtle, an important predator in coral reef ecosystems. *Marine Ecology Progress Series*, 245, 249-258.
- Llamas, I., Flores, E. E., Abrego, M. E., Seminoff, J. A., Hart, C. E., Donadi, R., Peña, B., Álvarez, G., Poveda, W., Amorocho, D., & Gaos, A. (2017). Distribution, size range and growth rates of hawksbill turtles at a major foraging ground in the eastern Pacific Ocean. *Latin American Journal of aquatic research*, 45(3), 585-596.
- 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.
- Martínez, L. M. & Páez, V. P. (2000). Ecología de anidación de la tortuga golfina (*Lepidochelys olivacea*) en la playa de La Cuevita, costa pacífica chocoana, Colombia, en 1998. *Actual Biol.*, 22(73),131-143.
- Márquez, R. (1996). Las tortugas marinas y nuestro tiempo. Fondo de cultura económica. Ciudad de México, México.

- Mejía, J. (2020). Caracterización de la playa Puerto Arista, Chiapas y la anidación de la tortuga golfina (*Lepidochelys olivacea*) durante el periodo 2014-2015. Tesis de Licenciatura, Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas <https://repositorio.unicach.mx/handle/20.500.12753/1967?show=full>
- Ministerio de Ambiente de Panamá. (2017). Diagnóstico de la Situación de las Tortugas Marinas y Plan de Acción Nacional para su Conservación. Edgar A. Araúz A., Lucas Pacheco., Shirley Binder y Ricardo de Ycaza. Ministerio de Ambiente, Ciudad de Panamá.
- Ministerio de Ambiente de Panamá. (2019). Informe del estado parte sobre el sitio de Patrimonio Mundial Parque Nacional Coiba y su Zona Especial de Protección Marítima. Presentado ante el Comité de Patrimonio Mundial (UNESCO) en atención al párrafo sétimo de la decisión 42 com 7B.87.
- Nakamura, M. F., Santos, J. B., Lobão-Soares, B., & Corso, G. (2019). Lunar phases and hawksbill sea turtle nesting. *Journal of Ethology* 37(3), 307-316.
- Nayelli Rangel Aguilar, B., Ribeiro, M. V., Oliveira Arantes, M., Alvarez, M. R., Miranda, M. R., & Schiavetti, A. (2022). Nest density and Nest Predation of sea turtle (Testudines, Chelonidae) by canids in Southern Bahia, Brazil. *Studies on Neotropical Fauna and Environment*, 57(3),1-11. <https://doi.org/10.1080/01650521.2022.2133591>
- Ortiz Garzón, D. (2022). Estrategia de conservación y principales amenazas de la tortuga golfina (*Lepidochelys olivacea*) en la localidad de Puerto Arista, Tonalá, Chiapas. Tesis de Licenciatura. Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas. <https://repositorio.unicach.mx/handle/20.500.12753/4283>
- Parada, R. N. (2018). Comportamiento de hembras anidantes y neonatos de la tortuga Golfina (*Lepidochelys olivacea*) en la playa Coquí, Pacífico Chocoano, Colombia. Tesis de licenciatura. Facultad de Ciencias, Universidad El Bosque, Bogotá, Colombia.
- Patiño, J., Marco, A., Quiñones, L., & Hawkes, L. (2012). A potential tool to mitigate the impacts of climate change to the Caribbean leatherback sea turtle. *Global Change Biology* 18(2), 401-411.

- Piedra-Castro, L., & Morales-Cerdas, V. (2015). Preferencias en la anidación de tortugas Carey (*Eretmochelys imbricata*) y baulas (*Dermochelys coriacea*) en el Refugio Nacional de Vida Silvestre Gandoca Manzanillo, Limón, Costa Rica. *Tecnología en Marcha*, 28(3), 86-98.
- 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, Panamá.
- Rincón-Díaz, M. O., & Rodríguez-Zárate, C. J. (2004). Caracterización de playas de anidación y zonas de alimentación de tortugas marinas en el Archipiélago de San Bernardo, Caribe Colombiano. *Bol. Invest. Mar. Cost.*, 33(1), 137-15.
- Rodríguez, B. & Contreras, M. (2020). Conservación de tortugas Lora (*Lepidochelys olivacea*), en playa Mata Oscura, Veraguas, pacífico de Panamá. *Revista Saberes APUDEP*, 3(2), 82-91.
- Rojas, A. E. F., Suárez, J. E. L., & Barbosa, N. P. (2016). Frecuencia de anidación de *Lepidochelys olivacea* en dos playas de Cabo San Lucas, México. *Conexión Agropecuaria JDC*. 6(2), 73-85.
- Royo, P. (2014). Evaluación del éxito de incubación en vivero de tortuga lora (*Lepidochelys olivacea*) en playa Mata Oscura, Veraguas, Panamá. Tesis de licenciatura. Facultad de Ciencias del Mar, Universidad Marítima Internacional de Panamá, Panamá.
- Rubiano, D. (2011). Caracterización de playas de anidación de tortugas marinas en Isla Fuerte, Bolívar, Caribe Colombiano. Tesis de Licenciatura. Facultad de Ciencias, Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia.
- Santidrián, P., Roberts, S. A., Hernández, R., Spotila, J. R., & Paladino, F. V. (2015). Nesting ecology of East Pacific green turtles at Playa Cabuyal, Gulf of Papagayo, Costa Rica. *Marine Ecology*, 36(3), 506-516.
- Zavaleta-Lizárraga, L., & Morales-Mávil, J. E. (2013). Nest site selection by the green turtle (*Chelonia mydas*) in a beach of the north of Veracruz, Mexico. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 84(3), 927-937.



INTERACCIÓN DE *PROROCENTRUM LIMA* CON LAS MACROALGAS *AGAROPHYTON CHILENSIS*, *ULVA SPP.* Y *CODIUM FRAGILE* Y SU EFECTO EN LA ESTIMULACIÓN DEL EPIFITISMO

INTERACTION OF *PROROCENTRUM LIMA* WITH THE MACROALGAE *AGAROPHYTON CHILENSIS*, *ULVA SPP.* AND *CODIUM FRAGILE* AND ITS EFFECT ON THE STIMULATION OF EPIPHYTISM

Roberto Pino Selles

Universidad de Panamá, Facultad de Ciencias Naturales, Exactas y Tecnología, Departamento de Biología Marina y Limnología, Panamá.

roberto.pino@up.ac.pa

<https://orcid.org/0000-0002-0782-2459>

Eduardo Uribe

Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, Doctorado en Acuicultura, Programa Cooperativo, Chile.

euribe@ucn.cl

<https://orcid.org/0000-0003-4913-8038>

Gonzalo Álvarez

Universidad Católica del Norte, Facultad de Ciencias del Mar, Departamento de Acuicultura, Chile.

gmalvarez@unc.cl

<https://orcid.org/0000-0001-5812-1559>

Fecha de recepción: 10 de julio de 2023

Fecha de aceptación: 5 de octubre de 2023

DOI <https://doi.org/10.48204/j.tecno.v26n1.a4650>

RESUMEN

Prorocentrum lima ha presentado frecuentes estudios en el área acuícola, dentro del control de seguridad de moluscos bivalvos. Este dinoflagelado no ha sido cultivado a gran escala en un marco autotrófico con medios de cultivo inorgánicos. El presente estudio busca comprender su carácter epífito-bentónico y sus interacciones con algunas macroalgas para desarrollar nuevas tecnologías y cultivarlo a gran escala. La cepa de *P. lima* se aisló de *Codium fragile*, y en cultivo con medio inorgánico se obtuvo su máxima densidad celular ($20\,317\text{ células mL}^{-1}$) el día 24, con una tasa de crecimiento promedio de $0.0815 \pm 0.2027\text{ div día}^{-1}$. En una simulación de cultivo de mesocosmos en condiciones ambientales naturales y controladas, *P. lima* epifitó a las macroalgas *Agarophyton chilensis*, *Ulva* spp. y *C. fragile*, además de todas las estructuras inertes presentes en los estanques de cultivo. Sin embargo, presentó la mayor

densidad (80 053 células g⁻¹ FW) sobre *A. chilensis*, en condiciones controladas a los 13 días de cultivo. Las macroalgas estarían aportando nutrientes orgánicos específicos que estimularían el crecimiento de *P. lima*.

PALABRAS CLAVES

Prorocentrum lima, mesocosmos, macroalgas, nutrientes.

ABSTRACT

Prorocentrum lima has presented frequent studies in the aquaculture area, within security control of bivalve mollusks. This dinoflagellate has not been cultivated on a large scale in an autotrophic framework with inorganic culture media. The present study seeks to understand its epiphyte-benthic character and its interactions with some macroalgae to develop new technologies and cultivate it on a large scale. The *P. lima* strain was isolated from *Codium fragile*, and in culture with inorganic medium its maximum cell density (20 317 cells mL⁻¹) was obtained on day 24, with an average growth rate of 0.0815 ± 0.2027 div day⁻¹. In a mesocosm culture simulation under natural and controlled environmental conditions, *P. lima* epiphyted the macroalgae *Agarophyton chilensis*, *Ulva* spp. and *C. fragile*, in addition to all the inert structures present in the culture ponds. However, it presented the highest density (80 053 cells g⁻¹ FW) on *A. chilensis*, under controlled conditions at 13 days of culture. The macroalgae would be providing specific organic nutrients that would stimulate the growth of *P. lima*.

KEY WORDS

Prorocentrum lima, mesocosmos, macroalgae, nutrient.

INTRODUCCIÓN

Se han registrado floraciones algales nocivas (FAN) de dinoflagelados epífitos-bentónicos en todos los océanos, especialmente en aguas tropicales y subtropicales asociadas a la presencia de especies correspondientes a los géneros *Gambierdiscus*, *Ostreopsis*, *Prorocentrum*, *Coolia* y *Amphidinium* (Aligizaki & Nikolaidis, 2006; Alikasi & Nikolaidis, 2008; David et al., 2018; Faust, 1991; Fukuyo, 1981; Fukuyo, 1995; Karafas et al., 2015; Laza-Martinez et al., 2011; Lewis et al., 2018; Mangialajo et al., 2011; Nagahama et al., 2011; Penna et al., 2005; Tawong et al., 2014). Algunas especies de *Prorocentrum*, que son asociadas a la síntesis de ácido okadaico (AO) y sus Dinophysistoxinas derivadas (DTXs) (Koike et al., 1998; Foden et al., 2005; Murakami et al., 1982; Nascimento et al., 2005; Paz et al., 2006), a menudo constituyen una parte importante de esta comunidad de microalgas (Carlson & Tindall, 1985).

Los programas de vigilancia para el registro de estos dinoflagelados epibentónicos tóxicos son altamente complejos y requieren un procedimiento de obtención de muestras diferente al de los organismos planctónicos causantes de las FAN (Berdalet et al., 2016; GEOHAB, 2012; . El método más utilizado consiste en la recolección de sustratos naturales, para luego separar y cuantificar la comunidad epibentónica presente (Litaker et al., 2010) obteniendo un gran número de muestras (Lobel et al., 1988), lo que dificulta su análisis (Tester et al., 2014).

Los dinoflagelados bentónicos pueden variar en composición y abundancia de células, lo cual depende de variables ambientales como la temperatura, salinidad, luz y nutrientes (Arbeláez et al., 2020 ; Bomber et al., 1988; Carlson & Tindall, 1985; Chinain et al., 1999; Hales et al., 1999; Kibler et al., 2015; Lartigue et al., 2009; Okolodrov et al., 2014; Pearce et al., 2001). Además su ocurrencia y abundancia depende de los sustratos, que pueden estar constituidos por diferentes especies de macroalgas, pastos marinos y corales (Fukuyo, 1981; Irola-Sansores et al., 2018; Lobel et al., 1988; Nakahara et al., 1996; Parsons & Preskitt, 2007; Parsons et al., 2011).

Actualmente, existe poco conocimiento sobre la relación de los dinoflagelados epífitos y los productos extracelulares liberados o exudados por las macroalgas, que pueden incrementar o inhibir su crecimiento (Bomber et al., 1989; Carlson et al., 1984; Rains & Parsons, 2015). Estos compuestos serían utilizados por los dinoflagelados en estrategias nutricionales como la mixotrofia y la heterotrofia, adquiriéndolos no sólo de las aguas circundantes, sino también de los sedimentos o de las superficies sobre las que viven (Litaker et al., 2010).

Algunas especies de dinoflagelados, como *P. lima* (Ehrenberg) F. Stein 1878, son especies epibentónicas que se extienden a aguas templadas no subtropicales (Lassus et al., 2016), tal aguas costeras del centro norte de Chile (Uribe et al., 2018). Durante las últimas décadas, esta especie han sido ampliamente estudiada por su capacidad para producir toxinas diarreicas, incluidas AO, DTX y otros análogos (Marr et al., 1992; Torgensen et al., 2008; Uchida et al., 2014; Lee et al., 2015; Hu et al., 2017; Yang et al., 2017; Wu et al., 2020), aunque la toxicidad de algunos aún es incierta (Hu et al., 2010).

Hasta la fecha, el cultivo masivo de *P. lima* se ha explorado con poco éxito con el uso de medios de cultivo inorgánicos (Bravo et al., 2001; Foden et al., 2005; Heredia-Tapia, 2005; Hou et al., 2015; Nascimento et al., 2016; Nascimento et al., 2005; Praptiwi, 2014; Vale et al., 2009; Vanucci et al., 2010; Varkitzi et al., 2010; Varkitzi et al., 2017;

Gu et al., 2019; Tarazona, 2019; Wang et al., 2015; Wu et al., 2020), enfocado principalmente al estudio de metabolitos tóxicos en laboratorio (Hu et al., 1992; Murakami et al., 1982). Además, se han utilizado dos sistemas para la producción de biomasa de *P. lima*, el cultivo semicontinuo (Varkitzi et al., 2017) y los fotobiorreactores (Wang et al., 2015), ambos casos están restringidos a condiciones autotróficas.

En el norte de Chile, se registra por primera vez un pequeño florecimiento de *P. lima* en Bahía Calderilla, que es una bahía semicerrada de aguas poco profundas, ubicada aproximadamente 5 km al norte de Bahía Inglesa, donde el cultivo industrial de vieiras (*Argopecten purpuratus*) mediante acuicultura, se lleva a cabo. Durante este florecimiento se encontraron células distribuidas en la columna de agua, arena, rocas y macroalgas (*C. fragile*, *A. chilensis* y *Ulva* spp.) del entorno (Uribe et al., 2018). Con *P. lima* se brinda la oportunidad de realizar un estudio para entender la interacción residente-huésped. Por lo tanto, se utilizan sustratos vivos (macroalgas) dentro de un sistema de cultivo de mesocosmos en un ambiente controlado y natural, con el propósito de conocer si los sustratos brindan estimulación o inhibición al crecimiento de *P. lima*.

MATERIALES Y MÉTODOS

Colecta, aislamiento y cultivo de cepas de *P. lima*

Las muestras biológicas fueron recolectadas en diciembre de 2017 en el sector costero de Bahía Calderilla, Región de Atacama, Chile (27°5'16.25" S y 70°51'21.07" O). Estas muestras tomadas entre 0.2 a 0.4 m de profundidad estuvieron conformadas por las macroalgas dominantes *Agarophyton chilensis*, *Ulva* spp. y *Codium fragile*.

De cada una de ellas se tomaron seis muestras de 300 g, las cuales se pusieron en una bolsa plástica con 500 mL de agua de mar. Posteriormente, se almacenaron en una caja térmica y se trasladaron al Laboratorio de Producción Primaria y Fitoplancton de la Universidad Católica del Norte para su análisis.

En el laboratorio, las muestras fueron agitadas vigorosamente para desprender los epifitos. Posteriormente, el agua fue filtrada utilizando un filtro de 20 µm, para concentrar las microalgas y retener el perifiton. Cada célula microalgal fue observada utilizando un microscopio fotónico invertido Olympus CKX41 en búsqueda del dinoflagelado *P. lima*.

Una vez identificado y con el propósito de establecer cultivos clonales, células de *P. lima* fueron aisladas utilizando la técnica de micropipeteo y lavado consecutivo (Stein, 1973).

Los cultivos fueron desarrollados en placas de cultivo celular estériles de 24 pocillos, por lo que cada célula aislada fue depositada individualmente en un pocillo de 2 mL con 1 mL de medio de cultivo L1 sin silicato (L1-Si) (Guillard & Hargraves, 1993). Cada placa de cultivo se incubó en ambiente controlado a una temperatura de 20 °C, bajo una irradiación de 80 μmol de fotones $\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$ y con un fotoperiodo de 12 h: 12 h (luz/oscuridad).

Luego de 60 días, cuando el cultivo alcanzó una densidad aproximada de 1 000 células mL^{-1} se inocularon por triplicado 30 mL en matraces de vidrio de 250 mL con 100 mL del medio (L1-Si) con densidades celulares entre 500 y 1 000 células mL^{-1} , y se cultivaron en ambiente controlado con las condiciones previamente señaladas, luego se determinó el crecimiento poblacional de los cultivos registrando las densidades celulares cada tres días con una cámara de recuento celular Sedgwick-Rafter y expresando los resultados en células mL^{-1} , siguiendo la metodología establecida por LeGresley & McDermott, 2010.

También de cada cultivo se estimaron las tasas de crecimiento diario experimentales (día^{-1}), según el protocolo señalado por Levasseur et al., (1993).

Adicionalmente, con los valores de las densidades celulares experimentales se estimaron las tasas de crecimiento máximas y las concentraciones celulares máximas, mediante un modelo matemático de crecimiento exponencial con saturación, a partir de la observación inicial (día 0), para estandarizar las tasas de crecimiento y las respectivas curvas de crecimiento de la cepa.

El modelado numérico de los datos de crecimiento se realizó con el método de mínimos cuadrados no lineales del macro "Solver" de la hoja de cálculo de Microsoft Excel y el error asociado a las estimaciones de los parámetros (como intervalos de confianza) se calculó y evaluó mediante la prueba t de Student y se determinó la curva de crecimiento.

Preparación de mesocosmos marino

Se prepararon dos estanques cilíndricos de fibra de vidrio transparente con capacidad de 500 L. El estanque N° 1 para realizar un cultivo mesocosmos en ambiente natural y el N° 2 para un cultivo en ambiente controlado.

A ambos estanques, se les agregó arena limpia de playa, cuatro rocas pequeñas, lisas, planas y limpias de la zona intermareal. Además, se agregaron 400 gramos de cada macroalga (*A. chilensis*, *Ulva* spp. y *C. fragile*), ancladas en la arena. Finalmente, se agregaron 100 L de agua de mar microfiltrada (1 μm) sin nutrientes y se les suministró aire a través de mangueras transparentes y piedras difusoras.

Posteriormente, cada estanque fue inoculado con dos litros de cultivo de la cepa de *P. lima*, alcanzando una densidad de 880 células mL^{-1} para el estanque N° 1 y 651 células mL^{-1} para el estanque N° 2. El estanque N° 1 fue ubicado en un patio de luz exterior con un fotoperiodo estival, donde la irradiancia ($\mu\text{mol fotonos m}^{-2}\text{s}^{-1}$) fue registrada cada hora durante 19 días, con un sensor LiCor Li200X y la temperatura del agua ($^{\circ}\text{C}$), diariamente y cada dos horas durante el día, con un termómetro electrónico Checktemp 1 Hanna. El estanque N° 2 se ubicó en un laboratorio de ambiente controlado a 16 $^{\circ}\text{C}$, con un fotoperiodo de 12 h: 12 h (luz/oscuridad) y con una intensidad de irradiación (I_0) de 80 $\mu\text{mol fotonos m}^{-2}\text{s}^{-1}$, para los 19 días.

En ambos estanques, cada tres días se recolectaron muestras de 20 g de las tres macroalgas por triplicado. Estas muestras fueron colocadas en bolsas plásticas con 100 mL de agua de mar microfiltrada (0.45 μm) y se agitaron vigorosamente durante tres minutos para separar las células de *P. lima* de la superficie de las algas. Este procedimiento se repitió tres veces con el propósito de asegurar el completo desprendimiento de las células. Posteriormente, se determinó la densidad celular usando una cámara de recuento Sedgwick-Rafter. Para expresar la cantidad de células g^{-1} respecto al peso húmedo (P_m) de cada macroalga, se usó el procedimiento descrito por Reguera et al., (2011).

Los valores obtenidos fueron empleados para generar las curvas de crecimiento en el programa Excel, comparando las densidades celulares obtenidas sobre las tres especies macroalgales. Los resultados experimentales se analizaron estadísticamente con un análisis de varianza unidireccional ANOVA y realizando la prueba post-hoc de Fisher, para evaluar la variabilidad del máximo número de células de *P. lima* en ambos mesocosmos y entre las mismas macroalgas en los dos estanques. Todos los análisis se desarrollaron utilizando el programa estadístico Statistic 7 (V.7).

RESULTADOS

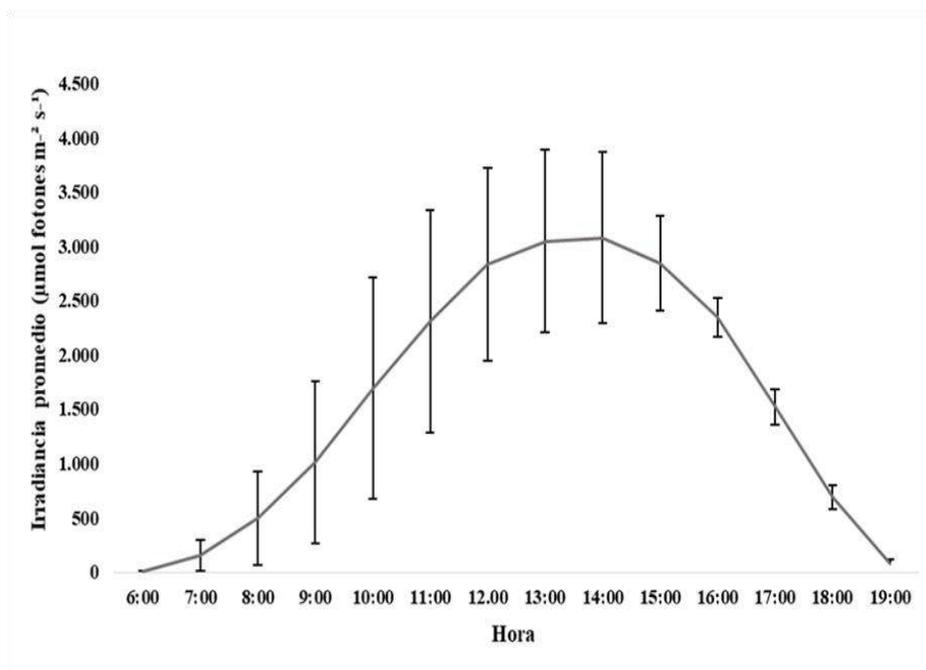
Colecta, aislamiento y cultivo de cepas de *P. lima*

De las tres especies de macroalgas muestreadas, sólo en *C. fragile* se encontraron

células del dinoflagelado *P. lima*. Al cultivarla, esta cepa creció rápidamente, alcanzando la densidad celular máxima experimental de $20\,317 \pm 1\,377$ células mL^{-1} el día 24, mientras que la densidad celular máxima teórica fue de $19\,422 \pm 382$ células mL^{-1} ($R^2 > 0.9723$). Posteriormente la densidad empezó a disminuir, llegando a los valores ($18\,117 \pm 2\,153$ células mL^{-1}) el día 39 (Figura 1).

Figura 1.

Crecimiento experimental (línea con marcadores) y su ajuste de crecimiento teórico (marcadores) de la cepa D008-2 de Prorocentrum lima en 100 mL de LI-Si



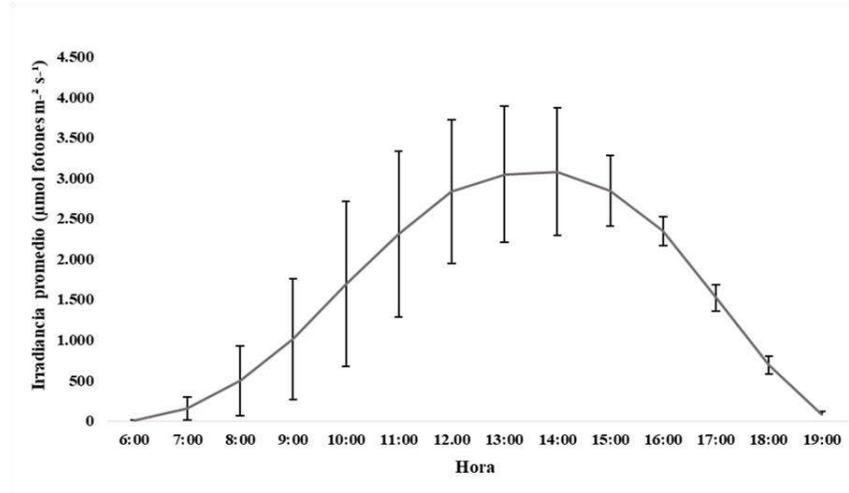
Esta cepa obtuvo una tasa de duplicación experimental de 0.2115 ± 0.2975 día⁻¹ hasta los 15 días de cultivo. Además, su tasa de crecimiento máxima teórica fue de 0.1544 ± 0.0253 día⁻¹.

Mesocosmos marino

El mesocosmos en el patio de luz exterior (ambiente estival) recibió una irradiancia de entre 31 - 420 $\mu\text{mol fotones m}^{-2} \text{s}^{-1}$ a las 7:00 horas, alcanzando la irradiación más alta a las 14:00 horas con 1 508 – 3 638 $\mu\text{mol fotones m}^{-2} \text{s}^{-1}$, mientras que a las 19:00 horas se obtuvo entre 27 y 741 $\mu\text{mol de fotones m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (Figura 2), observándose mayor estabilidad en la irradiación después de las 16:00 horas.

Figura 2.

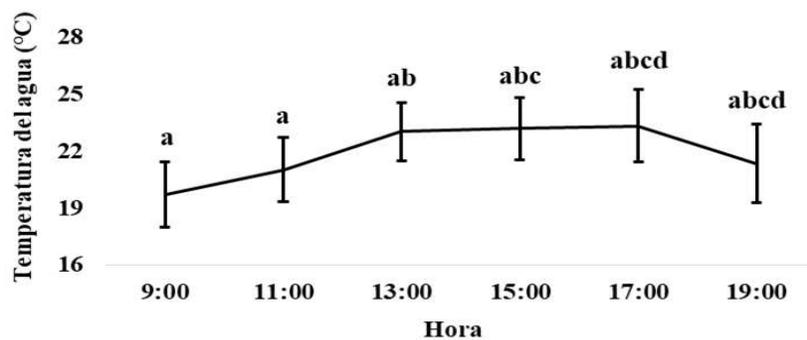
Irradiación promedio diaria en el estanque correspondiente al mesocosmos de verano (febrero a marzo de 2019)



El registro de la temperatura del agua del estanque en los 19 días del estudio presentó durante el día una temperatura promedio diaria de 21.9 ± 1.4 °C, estabilizándose entre las 13 y 17 horas con variaciones promedio entre 23.0 y 23.3 °C (Figura 3.). Esta temperatura estuvo por debajo de 21.3 ± 2.0 °C en las noches y luego del amanecer volvía a aumentar. El máximo promedio obtenido fue de 23.5 ± 0.7 °C, mientras que el mínimo fue de 19.8 ± 1.3 °C.

Figura 3.

Temperatura promedio diaria del agua en el estanque mesocosmos en condiciones naturales, durante febrero y marzo de 2019



En este estanque con ambiente estival la mayor densidad celular de *P. lima* correspondiente a $30\,267 \pm 2\,203$ células g^{-1} Pm (peso húmedo) se registró el día 16 sobre *A. chilensis*. Las máximas densidades sobre *A. chilensis* durante el estudio fueron significativamente mayores a las de las otras dos macroalgas ($p < 0.05$). Sobre *C. fragile* la máxima densidad celular correspondiente a $17\,700 \pm 2\,100$ células g^{-1} Pm fue registrada a los 13 días, mientras que en *Ulva* spp., fue de $15\,733 \pm 7\,943$ células g^{-1} Pm en el mismo periodo de tiempo (Figura 4; Tabla 1). A partir de los 13 días empezaron a disminuir las densidades celulares sobre *Ulva* spp. y *C. fragile*, mientras que sobre *A. chilensis* ocurrió desde el día 16. Sobre todas las macroalgas hubo un perfil de epifitación errático durante todas las curvas, pero en *Ulva* spp. y *C. fragile* se observó de manera más pronunciada al final de sus curvas de crecimiento.

Figura 4.

Densidades celulares de P. lima epifitando a A. chilensis, C. fragile y Ulva spp., dentro del mesocosmos en ambiente natural. Las letras diferentes indican diferencias entre las máximas densidades sobre las otras macroalgas ($p < 0,05$).

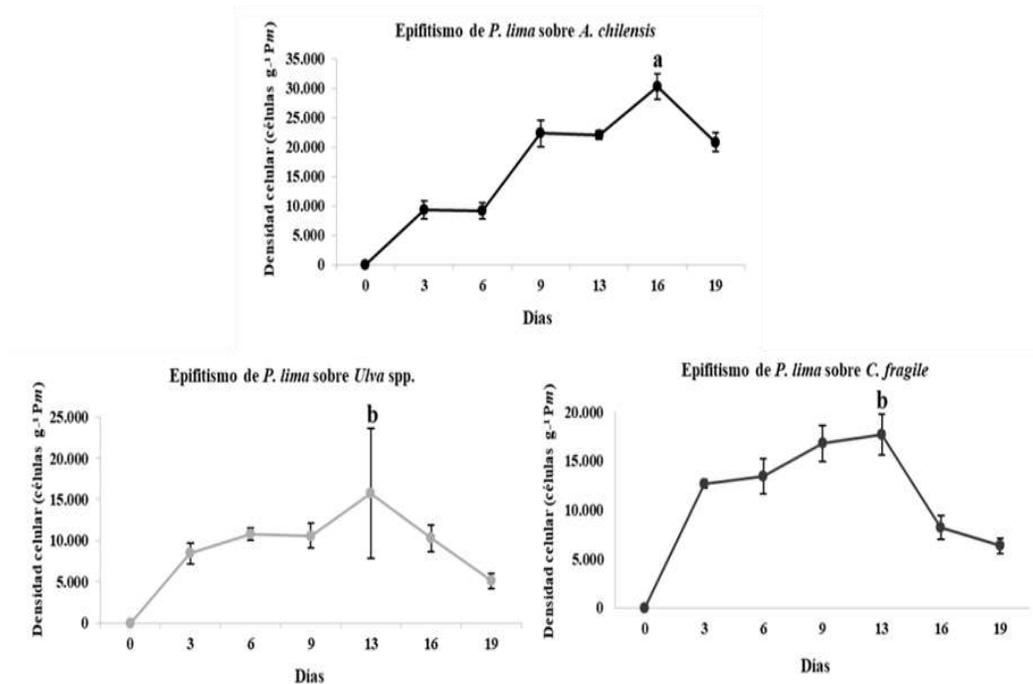


Tabla 1.

Máximas densidades celulares de *P. lima* [células g⁻¹ Pm (peso húmedo)] epifitando a *A. chilensis*, *C. fragile* y *Ulva* spp., dentro del mesocosmos bajo condiciones naturales (temporada estival) y condicionales controladas de laboratorio. Las letras diferentes indican diferencias entre las máximas densidades celulares sobre las otras macroalgas ($p < 0,05$)

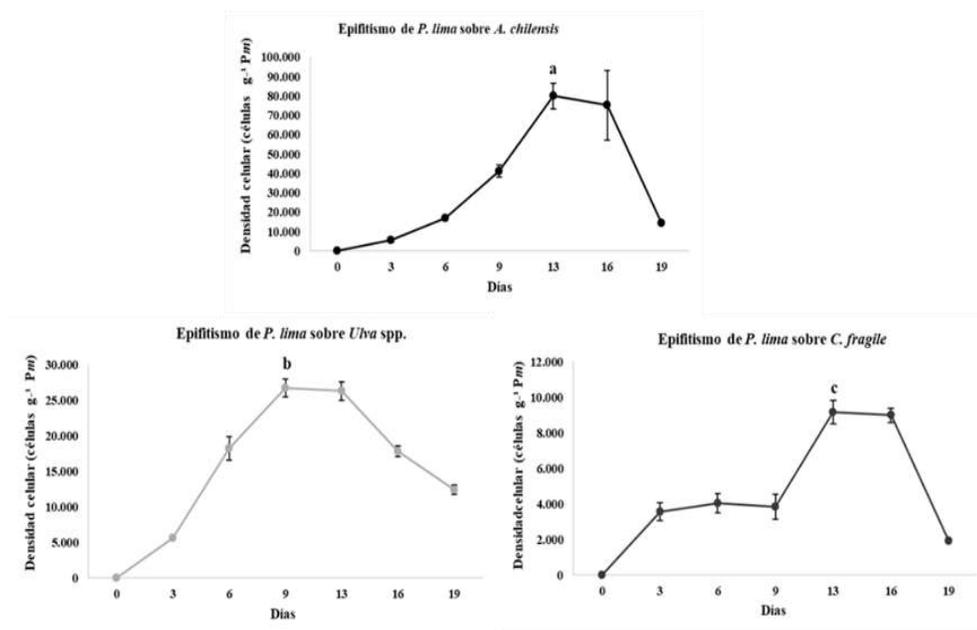
Mesocosmos	Sustrato macroalgal	Máxima densidad celular (células g ⁻¹ Pm)
Ambiente natural	<i>Agarophyton chilensis</i>	30.266 ± 2.203 ^a
	<i>Ulva</i> spp.	15.733 ± 7.943 ^b
	<i>Codium fragile</i>	17.700 ± 2.100 ^b
Ambiente controlado	<i>Agarophyton chilensis</i>	80.053 ± 6.617 ^a
	<i>Ulva</i> spp.	26.760 ± 1.124 ^b
	<i>Codium fragile</i>	9.165 ± 665 ^c

En el mesocosmos en ambiente controlado, el día 13 se registró una alta densidad celular de *P. lima* correspondiente a 80 053 ± 6 617 células g⁻¹ Pm epifitando a *A. chilensis*. En *Ulva* spp. se cuantificaron 26 760 ± 1 224 células g⁻¹ Pm en el día 9, mientras que en *C. fragile* se registraron 9 165 ± 665 células g⁻¹ Pm también el día 13 del estudio. Las densidades celulares empezaron a disminuir desde el día 13 sobre todos los sustratos macroalgales. Después del tercer día de la prueba, *C fragile* tuvo un perfil de epifitación muy errático en su curva de crecimiento.

Los datos estadísticos mostraron diferencias significativas ($p < 0.05$), entre las máximas densidades sobre las tres macroalgas durante el estudio (Figura 5; Tabla 1), obteniendo *A. chilensis* la mayor epifitación de *P. lima*, y *C. fragile*, la menor.

Figura 5.

Densidades celulares de *P. lima* epifitando a *A. chilensis*, *C. fragile* y *Ulva spp.*, dentro del mesocosmos bajo condiciones controladas de laboratorio. Las letras diferentes indican diferencias entre las máximas densidades celulares sobre las otras macroalgas ($p < 0,05$)



Las máximas densidades celulares de *P. lima* obtenidas sobre *C. fragile* durante todo el estudio presentaron diferencias ($p < 0.05$) entre sí, entre ambos mesocosmos, obteniéndose las mayores densidades celulares en el estanque en ambiente estival. De igual forma ocurrió entre las máximas densidades celulares obtenidas sobre *A. chilensis*, aunque las mayores densidades celulares se obtuvieron en el estanque en ambiente controlado. Sobre *Ulva spp.* también se obtuvo diferencias ($p < 0.05$) entre las mayores densidades celulares entre ambos estanques, pero en el estanque en ambiente controlado se reportó mayor densidad (Tabla 1).

DISCUSIÓN

Colecta, aislamiento y cultivo de cepas de *P. lima*

En diciembre de 2017, durante una floración detectada en el sector costero de Bahía Calderilla, en el Norte de Chile, se encontró la cepa D008-2 de *P. lima* epifitando a la macroalga *C. fragile*. Este evento fue similar al reportado por Uribe et al., (2018) en

ese mismo lugar, quienes en febrero de 2016 encontraron a *P. lima* sobre la superficie de diferentes macroalgas como *C. fragile*, *A. chilensis* y *Ulva* spp. Estos resultados señalan la selectividad de este dinoflagelado sobre varios sustratos macroalgales, y aunque en el presente estudio se encontró sólo sobre *C. fragile*, estas células pueden ser halladas en otras macroalgas que sean similares en su preferencia (Tester *et al.*, 2014).

La capacidad de *P. lima* de crecer sobre estos sustratos vivos ha sido descrita por Parsons & Preskitt, (2007); Tester *et al.*, (2014); Nishimura *et al.*, (2020), asociados a macroalgas como *Ulva*, *Gracilaria*, *Enteromorpha flexuosa* y *Gelidium pusillum*. Del mismo modo, otros dinoflagelados bentónicos pueden coexistir con macroalgas, como ha sido reportado por Bomber & Aikman, (1989), Faust, (1991) o Moreira-González *et al.*, (2018), quienes señalan que diversos dinoflagelados como *Amphidinium*, *Gambierdiscus*, *Coolia*, *Ostreopsis* y *Prorocentrum* habitan comúnmente en macroalgas como *Ulva*, *Heterosiphonia* y *Codium* en diversos hábitats marinos costeros, aunque también puede habitar sobre sustratos inertes y/o epifitando moluscos bivalvos.

Los valores de las mayores densidades celulares de *P. lima* al ser cultivada ($20\,317 \pm 1\,377$ células mL^{-1}), fueron similares a los reportados por Wang *et al.*, (2015) ($16\,000 - 25\,000$ células mL^{-1}) y a los de Varkitzi *et al.*, (2017) ($20\,690$ células mL^{-1}). No obstante, fueron superiores a los reportados por Bravo *et al.*, (2001) ($7\,000 - 15\,000$ células mL^{-1}) y a los de Aquino-Cruz *et al.*, (2018) ($600 - 11\,500$ células mL^{-1}) en similares condiciones de cultivo, lo cual demuestra que este dinoflagelado suele desarrollar variabilidades en su crecimiento (Bravo *et al.*, 2001). Por otra parte, la extensa fase estacionaria de 24 días obtenida, es señalada como muy característica de esta especie bentónica, ya que Nascimento *et al.*, (2005) registraron un tiempo similar de 20 días, con una fase exponencial de 25 días y una densidad celular máxima de 48.300 células mL^{-1} .

Mesocosmos marino

En el mesocosmos en ambiente natural, que registró altas variaciones en las irradiaciones (0 a $3\,000$ μmol fotones $\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$) y temperatura del agua (18.3 a 25.0°C), obtuvo un crecimiento limitado de *P. lima* en las tres macroalgas (*A. chilensis*, *Ulva* spp y *C. fragile*), no superando las $31\,000$ células g^{-1} Pm. En cambio, en el estanque con ambiente controlado la irradiación (80 μmol fotones $\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$) y la temperatura (16 ± 1 $^\circ\text{C}$), se mantuvieron constantes durante todo el estudio, permitiendo un mayor epifitismo de $26\,760$ y $80\,053$ células g^{-1} Pm sobre *Ulva* spp. y *A. chilensis*, respectivamente.

La estabilidad ambiental en el estanque con condiciones controladas fue favorable para el crecimiento de esta especie epífita. El desarrollo de esta especie de dinoflagelado en similares condiciones ha sido reportado por David et al., (2018), quienes al cultivar en matraces con 50 mL de f/2 a irradiaciones de 80 y 100 $\mu\text{mol fotones m}^{-2}\text{s}^{-1}$, lograron una alta tasa de crecimiento (0.23 día^{-1}) en su cepa de *P. lima*. La alta irradiación que recibe el cultivo en mesocosmos en ambiente natural a medio día, pudo fotoinhibir el aparato fotosintético de estas células, reduciendo las densidades celulares de *P. lima*, al no estar aclimatadas a la alta irradiación (David et al., 2018; López-Rosales et al., 2013; Praptiwi, 2014).

Por otra parte, *P. lima* logró desarrollarse entre los 16 a 25 °C de temperatura, sugiriendo una amplia tolerancia térmica de este dinoflagelado. En efecto, estas cepas en condiciones naturales han sido reportadas en áreas tropicales y subtropicales con temperaturas entre 19 y 33 °C (Aligizaki et al., 2009; Nagahama et al., 2011), 21 °C en este estudio, e incluso en regiones templadas o frías creciendo con temperaturas entre 5 y 25 °C (Morton et al., 1992). Estos resultados son también consistentes con las observaciones en laboratorio hechas por (Aquino-Cruz et al., 2018; López-Rosales et al., 2013; McLachlan et al., 1994; Varkitzi et al., 2017), quienes desarrollaron cultivos de esta especie y lograron crecimientos a temperaturas entre 20 y 30 °C. Del mismo modo, (Aquino-Cruz et al., 2018; McLachlan et al., 1994), demostraron que *P. lima* puede ser cultivada a temperaturas más bajas (15 °C), similar al cultivo desarrollado en ambiente controlado para la cepa (D008-2). Estos resultados indican que, para conseguir una alta densidad celular de esta especie, se debe cultivar bajo condiciones ambientales controladas, eligiendo las variables ambientales de acuerdo con el origen de la cepa a cultivar.

Sin embargo, también hay que considerar el sustrato para esta especie epífita, ya que el mesocosmos en ambiente natural, como en ambiente controlado presentó una preferencia al epifitismo sobre *A. chilensis*, seguido de *Ulva* spp. y finalmente en *C. fragile*.

En general, algunas investigaciones señalan que las relaciones simbióticas entre *P. lima* con macroalgas rodófitas en ambiente natural suelen ser comunes, reportando su interacción con *Acanthophora spicifera* (Morton & Faust, 1997), *Gelidiella* spp., *Gelidiopsis variabilis*, *G. salicornia* (Parsons & Preskitt, 2007), *Gracilaria gracilis* (Hachani et al., 2018), *Amphiroa* spp. (Irola-Sansores et al., 2018), *Gracilariopsis* spp. y *Gracilaria* spp. (Catuto-Magallan, 2019) y *Laurencia* spp. (Tarazona-Janampa et al., 2020), entre otras. Bravo et al., (2020) también reportaron la preferencia de

Prorocentrum spp. en diferentes macroalgas ramificadas como las rodófitas *Spyridea*, *Lophocladia* y *Asparagopsis*, y en la feófito *Halopteris*, observándose que las arquitecturas filamentosas y enredadas de estos talos, tienen una influencia en la abundancia de estos dinoflagelados. En el presente estudio ocurrió de manera similar con la estructura filamentosas y ramificada de *A. chilensis*.

Las rodófitas como *A. chilensis*, se caracterizan por tener polisacáridos estructurales conformados por agarosa, galactosa o ácido pirúvico (Matsuhira & Urzúa 1990; Chandia, 2020). En este contexto, es posible que *P. lima* en su condición de mixótrofo (Faust, 1998) tenga la capacidad de nutrirse de estos azúcares mediante una simple difusión, desdoblándolos a través de una rápida acción enzimática o utilizándolos como moléculas más pequeñas producidas por la acción enzimática bacteriana, incrementando su densidad celular.

El epifitismo de *P. lima* sobre *A. chilensis* tanto en ambiente natural, como controlado fue mayor que en *Ulva* spp. y *C. fragile*. Estas dos últimas macroalgas sintetizan polisacáridos altamente sulfatados que poseen un amplio espectro de actividad biológica, incluyendo la actividad antiproliferativa (Wang et al., 2014; Aumeerun et al., 2019) e inhibición de crecimiento, combatiendo a microalgas marinas como *Rhodorus magnei*, *Neorhodella cyanea* y *Prymnesium calathiferum* (Águila-Ramírez et al., 2012), por lo que esta actividad biológica pudo influir en la proliferación de *P. lima* sobre *Ulva* spp. y *C. fragile*.

CONCLUSIONES

Del perifiton obtenido, *P. lima* fue aislado únicamente en *C. fragile*, aunque puede ser encontrado en otras macroalgas. Este dinoflagelado suele desarrollar amplia tolerancia a diferentes irradiaciones y temperaturas, facilitando su proliferación sobre diversos hábitats. Al cultivarse en los mesocosmos, tanto en ambiente natural como controlado, epifitó a todas las macroalgas, pero presentando una mayor afinidad con *A. chilensis*. Además, también logró crecer sobre todas las estructuras inertes presentes en ambos estanques. El crecimiento de este dinoflagelado en un sistema de cultivo sin adición de nutrientes podría indicar que se estaría alimentando de los componentes liberados por los sustratos macroalgales.

CONFLICTOS DE INTERÉS

Los autores declaran no tener conflicto de intereses.

REFERENCIAS

- Águila-Ramírez, R., Arenas-González, A., Hernández-Guerrero, C., González-Acosta, B., Borges-Souza, J., Véron, B., & Hellio, C. (2012). Antimicrobial and antifouling activities achieved by extracts of seaweeds from Gulf of California, Mexico. *Hidrobiologica*, 22(1), 8–15.
- Aligizaki, K., & Nikolaidis, G. (2006). The presence of the potentially toxic genera *Ostreopsis* and *Coolia* (Dinophyceae) in the North Aegean Sea, Greece. *Harmful Algae*, 5(6), 717–730
<https://doi.org/10.1016/j.hal.2006.02.005>
- Aligizaki, K., & Nikolaidis, G. (2008). Morphological identification of two tropical dinoflagellates of the genera *Gambierdiscus* and *Sinophysis* in the Mediterranean Sea. *Journal of Biological Research*, 9, 75–82.
- Aligizaki, K., Nikolaidis, G., Katikou, P., Baxevanis, A., & Abatzopoulos, T. (2009). Potentially toxic epiphytic *Prorocentrum* (Dinophyceae) species in Greek coastal waters. *Harmful Algae*, 8(2), 299–311.
<https://doi.org/10.1016/j.hal.2008.07.002>
- Aquino-Cruz, A., Purdie, D., & Morris, S. (2018). Effect of increasing sea water temperature on the growth and toxin production of the benthic dinoflagellate *Prorocentrum lima*. *Hydrobiologia*, 813(1), 103–122.
<https://doi.org/10.1007/s10750-018-3512-4>
- Arbeláez, N., Mancera-Pineda, J., & Reguera, B. (2020). Structural variation of potentially toxic epiphytic dinoflagellates on *Thalassia testudinum* from two coastal systems of Colombian Caribbean. *Harmful Algae*, 92(January), 101738.
<https://doi.org/10.1016/j.hal.2019.101738>
- Aumeerun, S., Soulange-Govinden, J., Driver, M., Rao, A., Ravishankar, G., & Neetoo, H. (2019). Macroalgae and Microalgae. In *Handbook of Algal Technologies and Phytochemicals* (p. 207).
- Berdalet, E., Fleming, L., Gowen, R., Davidson, K., Hess, P., Backer, L., Moore, S., Hoagland, P. & Enevoldsen, H. (2016). Marine harmful algal blooms, human health and wellbeing: challenges and opportunities in the 21st century. *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom*, 96(1), 61–91.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1017/S0025315415001733>

- Bomber, J., & Aikman, K. (1989). The Ciguatera Dinoflagellates. *Biological Oceanography*, 6, 291–311.
- Bomber, J., Guillard, R., & Nelson, W. (1988). Roles of temperature, salinity, and light in seasonality, growth, and toxicity of ciguatera-causing *Gambierdiscus toxicus* Adachi et Fukuyo (Dinophyceae). *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.*, 115, 53–65.
- Bomber, J., Rubio, M., & Norris, D. (1989). Epiphytism of dinoflagellates associated with the disease ciguatera: substrate specificity and nutrition. *Phycologia*, 28(3), 360–368.
<https://doi.org/10.2216/i0031-8884-28-3-360.1>
- Bravo, I., Fernández, M. L., Ramilo, I., & Martínez, A. (2001). Toxin composition of the toxic dinoflagellate *Prorocentrum lima* isolated from different locations along the Galician coast (NW Spain). *Toxicon*, 39(10), 1537–1545.
[https://doi.org/10.1016/S0041-0101\(01\)00126-X](https://doi.org/10.1016/S0041-0101(01)00126-X)
- Bravo, I., Rodríguez, F., Ramilo, I., & Afonso-Carrillo, J. (2020). Epibenthic Harmful Marine Dinoflagellates from Fuerteventura (Canary Islands), with Special Reference to the Ciguatoxin-Producing *Gambierdiscus*. *J. Mar. Sci. Eng.*, 8, 0909.
- Carlson, R., Morey-Gaines, G., Tindall, D., & Dickey, R. (1984). Ecology of Toxic Dinoflagellates from the Caribbean Sea Effects of Macroalgal Extracts on Growth in Culture. *Sea Food Toxins*, 24, 271–287.
<https://doi.org/doi:10.1021/bk-1984-0262.ch024>
- Catuto-Magallan, R. (2019). *Composición y abundancia de dinoflagelados epibentónicos asociados a macroalgas en dos playas de la Provincia de Santa Elena*. Universidad Estatal Península de Santa Elena.
- Chandia, P. (2020). Valor agregado a macroalgas chilenas de exportación: caracterización de ficocoloides, denominación de origen y diversificación comercial. *Proyecto BBPP 18BPE-93853*.
- Chinain, M., Germain, M., Deparis, X., Pauillac, S., & Legrand, A. (1999). Seasonal abundance and toxicity of the dinoflagellate *Gambierdiscus* spp. (Dinophyceae), the causative agent of ciguatera in Tahiti, French Polynesia. *Marine Biology*, 135, 259–267. <https://doi.org/doi: 10.1007/s002270050623>

- David, H., Laza-Martínez, A., Kromkamp, J. C., & Orive, E. (2018). Physiological response of *Prorocentrum lima* (Dinophyceae) to varying light intensities. *FEMS Microbiology Ecology*, 94(1), 1–12. <https://doi.org/10.1093/femsec/fix166>
- Faust, M. (1995). Observation of sand-dwelling toxic dinoflagellates (Dinophyceae) from widely differing sites, including two new species. *Journal Phycol.*, 42, 154–159.
- Faust, M. A. (1998). Mixotrophy in tropical benthic dinoflagellates. In: Reguera, B., Blanco, J. Fernandez, L., Wyatt, T. (Eds.) *Harmful Algae. Xunta de Galicia and Intergovernmental Oceanographic Commission of UNESCO, Paris, Pp 390-393.*
- Faust, M., & Gullede, R. (2004). Identifying Harmful Marine Dinoflagellates. *Journal of Applied Phycology*, 16(1), 79. <https://doi.org/10.1023/b:japh.0000019147.40273.1b>
- Faust, M. A. (1991). Morphology of Ciguatera-causing *Prorocentrum lima* (Pyrrophyta) from widely differing sites. *J. Phycol.*, 27, 642–648.
- Foden, J., Purdie, D., Morris, S., & Nascimento, S. (2005). Epiphytic abundance and toxicity of *Prorocentrum lima* populations in the Fleet Lagoon, UK. *Harmful Algae*, 4, 1063–1074. <https://doi.org/https://10.1016/j.hal.2005.03.004>
- Fukuyo, Y. (1981). Taxonomical Study on Benthic Dinoflagellates Collected in Coral Reefs. *Bulletin of the Japanese Society of Scientific Fisheries*, 47(8), 967–978.
- GEOHAB. (2012). Global Ecology and Oceanography of Harmful Algal Blooms, GEOHAB Core Research Project: HABs in Benthic Systems. In A. Berdalet, E., Tester, P., Zingone (Ed.), *Organization*. IOC of UNESCO and SCOR, Paris and Newark.
- Gu, S., Xiao, S., Zheng, J., Li, H., Liu, J., & Yang, W. (2019). ABC Transporters in *Prorocentrum lima* and Their Expression Under Different Environmental Conditions Including Okadaic Acid Production. *Marine Drugs*, 17(259), 1–16.

- Guillard, R. R. L., & Hargraves, P. E. (1993). *Stichochrysis immobilis* is a diatom, not a chrysophyte. *Phycologia*, 32(3), 234–236. <https://doi.org/10.2216/i0031-8884-32-3-234.1>
- Hachani, M. A., Dhib, A., Fathalli, A., Ziadi, B., Turki, S., & Aleya, L. (2018). Harmful epiphytic dinoflagellate assemblages on macrophytes in the Gulf of Tunis. *Harmful Algae*, 77(June), 29–42. <https://doi.org/10.1016/j.hal.2018.06.006>
- Hales, S., Weinstein, P., & Woodward, A. (1999). Ciguatera (Fish Poisoning), El Niño, and Pacific Sea Surface Temperatures. *Ecosystem Health*, 5, 20–25. <https://doi.org/doi:10.1046/j.1526-0992.1999.09903.x>
- Heredia-Tapia, A., Arredondo-Vega, B., Nuñez-Vázquez, E., Yasumoto, T., Yasuda, M., & Ochoa, J. (2002). Isolation of *Prorocentrum lima* (Syn. *Exuviella lima*) and diarrhetic shellfish poisoning (DSP) risk assessment in the Gulf of California, Mexico. *Toxicon* 4, 40, 1121–1127.
- Hou, D., Liang, J., Zou, C., Li, H., Liu, J., & Yang, W. (2015). MRP functional activity and character in the dinoflagellate *Prorocentrum lima*. *Journal of Applied Phycology*, 28, 1667–1676. <https://doi.org/https://10.1007/s10811-015-0679-1>
- Hu, Tingmo, LeBlanc, P., Burton, I. W., Walter, J. A., McCarron, P., Melanson, J. E., Strangman, W., & Wright, J. L. C. (2017). Sulfated diesters of okadaic acid and DTX-1: Self-protective precursors of diarrhetic shellfish poisoning (DSP) toxins. *Harmful Algae*, 63, 85–93. <https://doi.org/10.1016/j.hal.2017.01.012>
- Hu, W., Xu, J., Sinkkonen, J., & Wu, J. (2010). Polyketides from Marine Dinoflagellates of the Genus *Prorocentrum*, Biosynthetic Origin and Bioactivity of Their Okadaic Acid Analogues. *Mini-Reviews in Medicinal Chemistry*, 10, 51–61. <https://doi.org/10.2174/138955710791112541>
- Irola-Sansores, E. D., Delgado-Pech, B., García-Mendoza, E., Núñez-Vázquez, E. J., Olivos-Ortiz, A., & Almazán-Becerril, A. (2018). Population dynamics of benthic-epiphytic dinoflagellates on two macroalgae from coral reef systems of the northern Mexican Caribbean. *Frontiers in Marine Science*, 5, 1–14. <https://doi.org/10.3389/fmars.2018.00487>

- Karafas, S., York, R., & Tomas, C. (2015). Morphological and genetic analysis of the *Coolia monotis* species complex with the introduction of two new species, *Coolia santacroce* sp. nov. and *Coolia palmyrensis* sp. nov. (Dinophyceae). *Harmful Algae*, 46, 18–33.
<https://doi.org/10.1016/j.hal.2015.05.002>
- Kibler, S. R., Tester, P. A., Kunkel, K. E., Moore, S. K., & Litaker, R. W. (2015). Effects of ocean warming on growth and distribution of dinoflagellates associated with ciguatera fish poisoning in the Caribbean. *Ecological Modelling*, 316, 194–210.
<https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2015.08.020>
- Lartigue, J., Jester, E. L. E., Dickey, R. W., & Villareal, T. A. (2009). Nitrogen source effects on the growth and toxicity of two strains of the ciguatera-causing dinoflagellate *Gambierdiscus toxicus*. *Harmful Algae*, 8, 781–791.
<https://doi.org/10.1016/j.hal.2008.05.006>
- Lassus, P., Chomerat, N., Hess, P., & Nezan, E. (2016). Microalgues toxiques et nuisibles de l'océan mondial. *COI Manuels et Guides*, 68 / *Toxic and Harmful Microalgae of the World Ocean. IOC Manuals and Guides*, 68.
- Laza-Martinez, A., Orive, E., & Miguel, I. (2011). Morphological and genetic characterization of benthic dinoflagellates of the genera *Coolia*, *Ostreopsis* and *Prorocentrum* from the south-eastern Bay of Biscay. *European Journal of Phycology*, 46(1), 45–65.
<https://doi.org/10.1080/09670262.2010.550387>
- Lee, S., Hwang, B., Kim, H., Yih, W., & Jeong, E. (2015). A New Diol Ester Derivative of Dinophysistoxin-1 from Cultures of *Prorocentrum lima* Collected in South Korea. *Bulletin of the Korean Chemical Society*, 395–398.
<https://doi.org/10.1002/bkcs.10031>
- LeGresley, M., & McDermott, G. (2010). Counting chamber methods for quantitative phytoplankton analysis - haemocytometer, Palmer-Maloney cell and Sedgewick-Rafter cell. In *Microscopic and molecular methods for Quantitative phytoplankton analysis*, 25–30.
- Levasseur, M., Thompson, P., & Harrison, P. (1993). Physiological acclimation of marine phytoplankton to different nitrogen sources. *J. Phycol.*, 29, 587–595.

- Lewis, N., Wolny, J., Achenbach, J., Ellis, L., Pitula, J., Rafuse, C., Rosales, D. & McCarron, P. (2018). Identification, growth and toxicity assessment of *Coolia meunier* (Dinophyceae) from Nova Scotia, Canada. *Harmful Algae*, 75, 45–56. <https://doi.org/10.1016/j.hal.2018.04.001>
- Litaker, R. W., Vandersea, M. W., Faust, M. A., Kibler, S. R., Nau, A. W., Holland, W. C., Chinain, M., Holmes, M., & Tester, P. A. (2010). Global distribution of ciguatera causing dinoflagellates in the genus *Gambierdiscus*. *Toxicon*, 56(5), 711–730. <https://doi.org/10.1016/j.toxicon.2010.05.017>
- Lobel, P., Anderson, D., & Durand-Clement, M. (1988). Assessment of Ciguatera Dinoflagellate Populations: Sample Variability and Algal Substrate Selection. *The Biological Bulletin*, 175(1), 94–101. <https://doi.org/10.2307/1541896>
- López-Rosales, L., Gallardo-Rodríguez, J. J., Sánchez-Mirón, A., Cerón-García, M. del C., Belarbi, E. H., García-Camacho, F., & Molina-Grima, E. (2013). Simultaneous effect of temperature and irradiance on growth and okadaic acid production from the marine dinoflagellate *Prorocentrum belizeanum*. *Toxins*, 6(1), 229–253. <https://doi.org/10.3390/toxins6010229>
- Mangialajo, L., Ganzin, N., Accoroni, S., Asnaghi, V., Blanfuné, A., Cabrini, M., Chavanon, F., Chiantore, M., Cohu, S., Costa, E., Fornasaro, D., Grosseil, H., Marco-Miralles, F., Masó, M., Reñé, A., Rossi, A., Sala, M., Thibaut, T., Totti, C., Vila, M., & Lemée, R. (2011). Trends in *Ostreopsis* proliferation along the Northern Mediterranean coasts. *Toxicon*, 57(3), 408–420. <https://doi.org/10.1016/j.toxicon.2010.11.019>
- Marr, J., Hu, T., Pleasance, S., Quilliam, M., & Wright, J. (1992). Detection of new 7-O-acyl derivatives of diarrhetic shellfish poisoning toxins by liquid chromatography-mass spectrometry. *Toxicon*, 30(12), 1621–1630.
- Matsuhiro, B., & Urzúa, C. (1990). Agars from *Gracilaria chilensis* (Gracilariales). *Journal of Applied Phycology*, 2(3), 273–279. <https://doi.org/https://10.1007/BF02179785>

- McLachlan, J. L., Marr, J. C., Conlon-Keily, A., & Adamson, A. (1994). Effects of nitrogen concentration and cold temperature on DSP-toxin concentrations in the dinoflagellate *Prorocentrum lima* (prorocentrales, dinophyceae). *Natural Toxins*, 2(5), 263–270.
<https://doi.org/10.1002/nt.2620020504>
- Moreira-González, A. R., Fernandes, L. F., Uchida, H., Uesugi, A., Suzuki, T., Chomérat, N., Bilien, G., & Mafra, L. L. (2018). Variations in morphology, growth, and toxicity among strains of the *Prorocentrum lima* species complex isolated from Cuba and Brazil. *Journal of Applied Phycology*, 31(1), 519–532.
<https://doi.org/10.1007/s10811-018-1587-y>
- Morton, S., & Faust, M. (1997). Survey of Toxic Epiphytic Dinoflagellates from the Belizean Barrier Reef Ecosystem. *Bulletin of Marine Science -Miami*, 61(3), 899–906.
- Morton, S., Norris, D., & Bomber, J. (1992). Effect of temperature, salinity and light intensity on the growth and seasonality of toxic dinoflagellates associated with ciguatera. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 157, 79–90.
[https://doi.org/10.1016/0022-0981\(92\)90076-M](https://doi.org/10.1016/0022-0981(92)90076-M)
- Murakami, Y., Oshima, Y., & Yasumoto, T. (1982). Identification of Okadaic Acid As a Toxic Component of a Marine Dinoflagellate *Prorocentrum lima*. *Nippon Suisan Gakkaishi*, 48(1), 69–72. <https://doi.org/https://10.2331/suisan.48.69>
- Nagahama, Y., Murray, S., Tomaru, A., & Fukuyo, Y. (2011). Species boundaries in the toxic dinoflagellate *Prorocentrum lima* (Dinophyceae, Prorocentrales), based on morphological and phylogenetic characters. *Journal of Phycology*, 47(1), 178–189.
<https://doi.org/10.1111/j.1529-8817.2010.00939.x>
- Nakahara, H., Sakami, T., Chinain, M., & Ishida, Y. (1996). The role of macroalgae in epiphytism of the toxic dinoflagellate *Gambierdiscus toxicus* (Dinophyceae). *Phycological Research*, 44(2), 113–117. <https://doi.org/10.1111/j.1440-1835.1996.tb00385.x>
- Nascimento, S. M., Purdie, D. A., & Morris, S. (2005). Morphology, toxin composition and pigment content of *Prorocentrum lima* strains isolated from a coastal lagoon in southern UK. *Toxicon*, 45(5), 633–649.
<https://doi.org/10.1016/j.toxicon.2004.12.023>

- Nascimento, S. M., Salgueiro, F., Menezes, M., Oliveira, F. de A., Magalhães, V. C. P., De Paula, J. C., & Morris, S. (2016). *Prorocentrum lima* from the South Atlantic: Morphological, molecular and toxicological characterization. *Harmful Algae*, 57, 39–48.
<https://doi.org/10.1016/j.hal.2016.05.006>
- Nishimura, T., Uchida, H., Noguchi, R., Oikawa, H., Suzuki, T., Funaki, H., Hara, C., Hagino, K., Arimitsu, S., Tanii, Y., Abe, S., Hashimoto, K., Mimura, K., Tanaka, K., Yanagida, & I. Adachi, M. (2020). Abundance of the benthic dinoflagellate *Prorocentrum* and the diversity, distribution, and diarrhetic shellfish toxin production of *Prorocentrum lima* complex and *P. caipirignum* in Japan. *Harmful Algae*, 96, 101687.
<https://doi.org/10.1016/j.hal.2019.101687>
- Okolodrov, Y., Merino-Virgilio, F., Aké-Castillo, J., Aguilar-Trujillo, A., Espinoza-Matías, S., & Herrera-Silveira, J. (2014). Seasonal changes in epiphytic dinoflagellate assemblages near the Northern coast of the Yucatan peninsula, Gulf of Mexico. *Acta Botanica Mexicana*, 107, 121–151.
- Parsons, M., & Preskitt, L. (2007). A survey of epiphytic dinoflagellates from the coastal waters of the island of Hawai'i. *Harmful Algae*, 6(5), 658–669.
<https://doi.org/10.1016/j.hal.2007.01.001>
- Parsons, M., Settlemier, C., & Ballauer, J. (2011). An examination of the epiphytic nature of *Gambierdiscus toxicus*, a dinoflagellate involved in ciguatera fish poisoning. *Harmful Algae*, 10(6), 598–605.
<https://doi.org/10.1016/j.hal.2011.04.011>
- Paz, B., Vázquez, J., Riobó, P., & Franco, J. (2006). Study of the effect of temperature, irradiance and salinity on growth and yessotoxin production by the dinoflagellate *Protoceratium reticulatum* in culture by using a kinetic and factorial approach. *Marine Environmental Research*, 62(4), 286–300.
<https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2006.04.066>
- Pearce, I., Marshall, J., & Hallegraeff, G. (2001). No Title. In: Hallegraeff, G.M., Blackburn, S.I., Bolch, C.J., Lewis, R.J. (Eds.), *Harmful Algal Blooms 2000. Intergovernmental Oceanographic Commission of UNESCO, Hobart, Tasmania*, 54–57.

- Penna, A., Garcés, E., Vila, M., Giacobbe, M. G., Fraga, S., Lugliè, A., Lugliè, A., Bravo, I., Bertozzini, & E. Vernesi, C. (2005). *Alexandrium catenella* (Dinophyceae), a toxic ribotype expanding in the NW Mediterranean Sea. *Marine Biology*, 148(1), 13–23.
<https://doi.org/10.1007/s00227-005-0067-5>
- Praptiwi, R. A. (2014). *Optimisation of high value metabolite production from benthic marine dinoflagellate Prorocentrum lima*. (Robert Gordon University).
<https://doi.org/10.1177/0266242610391936>
- Rains, L. K., & Parsons, M. L. (2015). *Gambierdiscus* species exhibit different epiphytic behaviors toward a variety of macroalgal hosts. *Harmful Algae*, 49, 29–39.
<https://doi.org/10.1016/j.hal.2015.08.005>
- Reguera, B., Alonso, R., Moreira, Á., & Silvia, M. (2011). Guía para el diseño y puesta en marcha de un plan de seguimiento de microalgas productoras de toxinas. *Manuales y Guías COI de UNESCO y OIEA, Paris y Viena. Manuales y Guías de La COI*, 59, 1–49.
- Stein, J. (1973). *Handbook of Phycological Methods: Culture Methods and Growth Measurements* (Cambridge).
- Tarazona-Janampa, U. (2019). *Effect of associated bacteria on growth and toxigenicity in cultured isolates of the dinoflagellate Prorocentrum lima from Mexico* *Effect of associated bacteria on growth and toxigenicity in cultured isolates of the dinoflagellate Prorocentrum lima from Me* (Universidad Veracruzana, Mexico).
<https://doi.org/https://10.13140/RG.2.2.12826.90567>
- Tarazona-Janampa, U., Cembella, A., Pelayo-Zárate, M., Pajares, S., Márquez-Valdelamar, L., Okolodkov, Y., Tebben, J., Krock, B., & Durán-Riveroll, L. (2020). Associated Bacteria and Their Effects on Growth and Toxigenicity of the Dinoflagellate *Prorocentrum lima* Species Complex From Epibenthic Substrates Along Mexican Coasts. *Frontiers in Marine Science* |, 7(569), 1–18.
<https://doi.org/10.3389/fmars.2020.00569>

- Tawong, W., Nishimura, T., Sakanari, H., Sato, S., Yamaguchi, H., & Adachi, M. (2014). Distribution and molecular phylogeny of the dinoflagellate genus *Ostreopsis* in Thailand. *Harmful Algae*, 37, 160–171. <https://doi.org/10.1016/j.hal.2014.06.003>
- Tester, P. A., Kibler, S. R., Holland, W. C., Usup, G., Vandersea, M. W., Leaw, C. P., Mohammad-Noor, N., Faust, M., & Litaker, R. W. (2014). Sampling harmful benthic dinoflagellates: Comparison of artificial and natural substrate methods. *Harmful Algae*, 39, 8–25. <https://doi.org/10.1016/j.hal.2014.06.009>
- Torgensen, T., Miles, C., Rundberget, T., & Wilkins, A. (2008). New Esters of Okadaic Acid in Seawater and Blue Mussels (*Mytilus edulis*). *J. Agric. Food Chem*, 56, 9628–9635.
- Uchida, H., Watanabe, R., Matsushina, R., Uchida, N., Nagai, H., Kamio, M., Murata, M., Yasumoto, T., & Suzuki, T. (2014). A Convenient HPLC Method for Detection of Okadaic Acid Analogs as 9-Anthrylmethyl Esters with Automated Sample Cleanup by Column Switching. *Journal of Aoac International*, 97(2), 391–397. <https://doi.org/10.5740/jaoacint.SGEUchida>
- Vale, P., Veloso, V., & Amorim, A. (2009). Toxin composition of a *Prorocentrum lima* strain isolated from the Portuguese coast. *Toxicon*, 54(2), 145–152. <https://doi.org/10.1016/j.toxicon.2009.03.026>
- Vanucci, S., Guerrini, F., Milandri, A., & Pistocchi, R. (2010). Effects of different levels of N- and P-deficiency on cell yield , okadaic acid , DTX-1 , protein and carbohydrate dynamics in the benthic dinoflagellate *Prorocentrum lima*. *Harmful Algae*, 9(6), 590–599. <https://doi.org/10.1016/j.hal.2010.04.009>
- Varkitzi, I., Hatzianestis, I., Pyrgaki, C., Pagou, K., Granelí, E., Pavlidou, A., Montesanto, B., & Economou-Amilli, A. (2010). Unbalanced N:P ratios and nutrient stress controlling growth and toxin production of the harmful dinoflagellate *Prorocentrum lima* (Ehrenberg) Dodge. *Harmful Algae*, 9, 304–311. <https://doi.org/10.1016/j.hal.2009.12.001>

- Varkitzi, I., Pagou, K., Pyrgaki, C., & Hatzianestis, I. (2017). A Biomass Upscale System for the Marine Dinoflagellate *Prorocentrum lima* and the Production of Bioactive Lipophilic Toxins. *International Journal of Applied Sciences and Biotechnology*, 5(4), 479–485. <https://doi.org/10.3126/ijasbt.v5i4.18561>
- Wang, L., Wang, X., Wu, H., & Liu, R. (2014). Overview on biological activities and molecular characteristics of sulfated polysaccharides from marine green algae in recent years. In *Marine Drugs* (Vol. 12). <https://doi.org/10.3390/md12094984>
- Wang, S., Chen, J., Li, Z., Wang, Y., Fu, B., Han, X., & Zheng, L. (2015). Cultivation of the benthic microalga *Prorocentrum lima* for the production of diarrhetic shellfish poisoning toxins in a vertical flat photobioreactor. *Bioresource Technology*, 179, 243–248. <https://doi.org/https://10.1016/j.biortech.2014.12.019>
- Wu, H., Chen, J., Peng, J., Zhong, Y., Guo, M., Tan, Z., Tan, Z., Zhai, Y., & Lu, S. (2020). Nontarget screening and toxicity evaluation of diol esters of okadaic acid and dinophysistoxins reveal intraspecies difference of *Prorocentrum lima*. *Environmental Science & Technology*, 1–40. <https://doi.org/10.1021/acs.est.0c03691>
- Yang, A., Lee, S., Du Yoo, Y., Seop Kim, H., Ju Jeong, E., & Rho, J. (2017). Limaol: A Polyketide from the Benthic Marine Dinoflagellate *Prorocentrum lima*. *Journal of Natural Products*, 80, 1688–1692. <https://doi.org/10.1021/acs.jnatprod.7b00127>



INFLUENCIA DEL SOLVENTE EN LA SÍNTESIS DE MEMBRANAS PIEZOELÉCTRICAS, BASADAS EN NANOFIBRAS DEL POLÍMERO POLIFLUORURO DE VINILIDENO

INFLUENCE ON THE SYNTHESIS OF PIEZOELECTRIC MEMBRANES, BASED ON POLYVINYLIDENE POLYFLUORIDE POLYMER NANOFIBERS.

María Gabriela Bryden Guerra

Universidad Autónoma de Chiriquí, David Chiriquí, Panamá.

maria.bryden@unachi.ac.pa

<https://orcid.org/0009-0007-9060-1676>

Leeyuand Oscar Cuan Miranda

Universidad Autónoma de Chiriquí, David Chiriquí, Panamá.

leeyuand.cuan@unachi.ac.pa

<https://orcid.org/0009-0006-3695-1985>

Fecha de recepción: 30 de julio de 2023

Fecha de aceptación: 6 de octubre de 2023

DOI <https://doi.org/10.48204/j.tecno.v26n1.a4652>

RESUMEN

Se compararon las características cualitativas y cuantitativas de membranas piezoeléctricas fabricadas con el polímero poli fluoruro de vinilideno, a través de la técnica de electro hilado (TEH).

Fabricamos membranas micro fibrosas del (PVDF), utilizando la técnica de electro hilado, en solución de Metiletilcetona (MEC) en una proporción de 2:1 y las comparamos con las fabricadas por otros autores, que utilizaron Dimetilformamida (DMF) como disolvente. Durante el proceso se aplicó una diferencia de potencial de 15,0 kV y se mantuvo la disolución viscoelástica del PVDF a una temperatura de 60°C. La hipótesis de trabajo se basó en analizar la influencia del soluto del polímero sobre dos propiedades específicas: (1) el diámetro de las microfibras del material polimérico PVDF, sintetizadas a través de la TEH y; (2) en la formación de la estructura cristalina rotacional del polímero, específicamente en la fase piezoeléctrica beta (β).

Para caracterizar las muestras sintetizadas se utilizaron las siguientes técnicas:

- Microscopia electrónica de barrido (SEM), con la cual logramos registrar el diámetro de las microfibras entre 85 a 113 nm.
- Difracción de rayos X (XRD), en donde las muestras generaron dispersiones en $2\theta = 18, 3^\circ, 19, 9^\circ$ y $20, 6^\circ$, lo cual nos indicó que la estructura cristalina obtenida, son propias de las fases piezoeléctricas alfa (α) y beta (β).
- Espectroscopia Raman, con la que se determinó un espectro con número de onda (k) entre 800 cm^{-1} a 840 cm^{-1} , lo cual sustentó los cambios que provocamos en la estructura interna del polímero, utilizando la mezcla DMF/MEC como solvente del polímero.

La cara caracterización de las muestras obtenidas nos permitió encontrar que las propiedades de las membranas micro fibrosas del polímero PVDF, son afectadas por el solvente utilizado en el proceso de síntesis. Al realizar comparaciones entre membranas que solo utilizaron DMF como disolvente, con nuestras membranas fabricadas con el solvente DMF/MEC, se generó una mayor concentración de fase estructural piezoeléctrica beta (β) en estas últimas, las cuales poseen mayor aplicación en dispositivos generadores de energía.

PALABRAS CLAVES

Membranas microfibras, dimetil formamida, metiletilcetona, estructuras piezoeléctricas, electro hilado.

ABSTRACT

The qualitative and quantitative characteristics of piezoelectric membranes manufactured with the polymer polyvinylidene fluoride, through the technique of electrospinning (TEH), using different synthesis processes, in particular using different solvents, were compared.

We fabricated micro fibrous (PVDF) membranes, using the electrospinning technique, in a 2:1 ratio of methyl ethyl ketone (MEC) solution and compared them with those manufactured by other authors, who used Dimethylformamide (DMF) as solvents. During the process, a potential difference of 15.0 kV was applied and the viscoelastic solution of the PVDF was maintained at a temperature of 60°C . The working hypothesis was based on analyzing the influence of the polymer solute on two specific properties: (1) the diameter of the microfibras of the PVDF polymeric material, synthesized through TEH and (2) in the formation of the rotational crystalline structure of the polymer, specifically in the beta (β) piezoelectric phase.

The following techniques were used to characterize the synthesized samples:

- Scanning electron microscopy (SEM), with which we were able to record the diameter of the microfibras between 85 and 113 nm.
- X-ray diffraction (XRD), where the samples generated dispersions at $2\theta = 18.7^\circ, 19.9^\circ$ and 20.6° , which indicated that the crystalline structure obtained is typical of the alpha (α) and beta (β) piezoelectric phases.

- Raman spectroscopy, with which a spectrum with a wave number (k) between 800 cm^{-1} to 840 cm^{-1} was determined, which supported the changes that we caused in the internal structure of the polymer, using the DMF/MEC mixture as polymer solvent.

The characterization of the samples obtained allowed us to find that the properties of the microfibrillar membranes of the PVDF polymer are affected by the solvent used in the synthesis process. When making comparisons between membranes that only used DMF as a solvent, with our membranes manufactured with the DMF/MEC solvent, a higher concentration of beta (β) piezoelectric structural phase was generated in the latter, which have a greater application in power generating devices.

KEY WORDS

Microfibrillar membranes, dimethyl formamide, methyl ethyl ketone, piezoelectric structures, electrospinning.

INTRODUCCIÓN

Actualmente, los materiales piezoeléctricos poseen gran cantidad de aplicaciones en el área de ciencias e ingeniería. Algunos de estos materiales, se construyen a partir de polímeros, específicamente basados en la creación de fibras micro o nanométricas, mediante la técnica de electrospinning (electrohilado), la cual ofrece múltiples ventajas, con propiedades únicas, frente a otras técnicas de síntesis. Por tal razón, existe un campo de investigación enfocado en la optimización de las propiedades piezoeléctricas de estos materiales, en donde se analiza el efecto de las variables involucradas en el proceso de síntesis, las cuales usualmente están relacionadas con sus propiedades piezoeléctricas macroscópicas, lo cual conllevará un efecto en las aplicaciones que se les pueda encontrar.

La Tecnología de Membranas es una disciplina relativamente joven y dinámica que todavía tiene un componente empírico importante. Es por esta razón que en la actualidad es ciertamente difícil encontrar una definición específica de membrana, que brinde una idea clara de aquello a lo que nos referimos. Esto deriva de la gran variedad morfológica, estructural y de composición que presentan los distintos materiales o dispositivos agrupados bajo el nombre genérico de membrana. Una definición comúnmente aceptada es la siguiente: “una membrana es una región material que actúa de barrera entre dos fluidos y que restringe o favorece el movimiento de uno o más componentes de los fluidos a través de ella” (Romero, 2014).

En esta investigación se seleccionó el polímero, polifluoruro de vinilideno, por sus características piezoeléctricas. Las películas delgadas de este material tienen un coeficiente piezoeléctrico que puede ser hasta de $6,7\text{ pC/N}$ (picocoulomb por newton),

es decir, diez veces mayor que la observada en cualquier otro polímero.

Cuando el PVDF es expuesto a la influencia de un campo eléctrico, cambia su forma. Dado que los átomos de flúor son mucho más electronegativos que los de carbono, toman electrones de los átomos de carbono a los cuales están unidos. Esto significa que los grupos de enlaces carbono-flúor $-(CF_2)-$ de la cadena serán muy polares, con una carga parcial negativa sobre los átomos de flúor y una carga parcial positiva sobre los átomos de carbono (Duque Sanchez et al., 2013). Así, cuando sean colocados en un campo eléctrico, se van a alinear. Esto causa la deformación del polímero, con todos sus grupos carbono-flúor $-(CF_2)-$ tratando de alinearse.

La técnica de electrospinning o electrohilado es ampliamente utilizada para la fabricación de fibras que abarcan rangos de escala desde las micras hasta los nanómetros. Esta técnica se fundamenta en el principio de estiramiento coaxial de la solución visco elástica de un polímero, al aplicarle fuerzas electroestáticas. (Nader et al., 2018)

En la actualidad, debido al auge de los materiales a escala nanométrica, se ha popularizado la técnica gracias a su bajo costo y sencilla ejecución; cambiando el enfoque de investigación hacia aspectos como la morfología de las fibras que se producen y la comprensión de la influencia de las variables de proceso sobre las propiedades de está. La caracterización de las micro y nano fibras fabricadas es llevada a cabo por muchos investigadores, empleando técnicas como la Microscopía Electrónica de Barrido (SEM), Difracción de rayos X (XRD), espectroscopia Raman.

El desarrollo de la técnica empieza con la obtención de una solución compuesta por un polímero completamente diluido en el o los disolventes que se hayan elegido para trabajar. Los polímeros son dieléctricos, ya que, en presencia de un campo eléctrico, pueden considerarse como un arreglo de dipolos eléctricos microscópicos compuestos por cargas positivas y negativas, cuyos centros no coinciden perfectamente, se mantienen en su lugar por acción de las fuerzas atómicas y moleculares, y solo pueden cambiar su posición ligeramente en respuesta a fuertes campos eléctricos externos, lo que explica por qué ocurre el estiramiento de la solución en el proceso. (Sánchez et al., 2013)

La mezcla polimérica se coloca en la jeringa, la cual se presiona hasta que se observe una gota, llamada cono de Taylor, suspendida en la punta del tubo capilar. En este punto se aplica un alto voltaje al polímero disuelto. Si la fuerza electroestática y la tensión superficial de la solución se encuentran equilibradas, se origina un flujo de solución

constante, desde el cono de Taylor. El flujo de solución viaja una distancia lineal de 1 a 2 centímetros, conocida como longitud de flujo (Asmatulu & Khan, 2019), luego experimenta un movimiento de espiral (inestabilidad de flexión) cuyo resultado es el alargamiento (cientos de veces) y refinamiento de la fibra que se produce, debido a la deformación plástica. El final del recorrido del flujo de solución polimérica es una pantalla recolectora donde se forma la membrana fibrosa.

La caracterización de las membranas micro fibrosas de PVDF se realizó principalmente con técnicas de análisis de superficies. La caracterización estructural de las superficies típicamente incluye difracción de rayos X (XRD) y (SEM). Además, es común la utilización de métodos de caracterización física y química como la espectroscopia Raman y la espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier (FTIR).

El centro de investigación de física aplicada (CIFA), de la Universidad Autónoma de Chiriquí, utiliza la técnica del electrospinning (ELH), para la creación de membranas micro fibrosas piezoeléctricas, basadas en polímeros piezoeléctricos, como el fluoruro de poli vinilideno (PVDF). Por este motivo, proponemos la realización de una investigación, en la cual se compare de forma cualitativa y cuantitativa membranas piezoeléctricas, fabricadas con la técnica de electrospinning, utilizando diferentes procesos de síntesis, específicamente cambios en los disolventes. Los cuales son N-dimetilformamida (DMF) y metiletilcetona (MEC).

Sus propiedades piezoeléctricas son notorias cuando el material se estira mecánicamente para orientar las cadenas moleculares y polaridad (bajo un fuerte campo eléctrico que induce un momento dipolar neto) bajo tensión. (Billmeyer, 1975)

Existen varias formas de PVDF, las cuales dependen de cómo están conformadas las cadenas ya sean con vínculos *trans* (T) o *gauche* (G), estas formas se expresan por fases, las cuales son:

- Fase alfa (TGTG)
- Fase beta (TTT)
- Fase gamma (TTTGTGG)

MATERIALES Y MÉTODOS

Entre los componentes básicos para la fabricación de las membranas poliméricas, está el Polyk 1006 (versión comercial del PVDF), el cual es una presentación granulada del fluoruro de poli vinilideno.

Dentro del proceso se utilizaron dos solventes, los mismos fueron: N-N dimetilformamida de masa molar de 73,09 g/mol, con fórmula química $\text{HCON}(\text{CH}_3)_2$, de marca MERK (REF-Merk site) y, la acetona del mismo proveedor, de masa molecular de 58,08 g/mol, con fórmula química CH_3COCH_3 . Los materiales aquí mencionados, se utilizaron de forma directa, es decir, que no se le aplica aditivos para modificarlo.

Preparación de la membrana.

En el proceso de preparación de nuestras muestras, basadas en membranas microfibras del PVDF (MMF-PVDF), se involucran dos fases: preparación de la solución viscoelástica y aplicación de la técnica de Electrohilado, las cuales fueron realizadas en el Centro de Investigación de Física Aplicada (CIFA).

Preparación de la solución viscoelástica

Para la preparación de la disolución viscoelástica del PVDF, se agregó 2,00 g de PVDF granulado en un recipiente de vidrio con rosca, seguidamente se añadió 5,60 g de Dimetilformamida DMF y 2,50 g de Metil etil cetona MEC.

Figura 1.

Sistema compuesto por agitador magnético y termómetro, lo cual permitió homogenizar la muestra y medir su temperatura para control de la variable.



Figura 2.

Mezcla de PVDF y MEC antes de ser homogenizada.



APLICACIÓN DE LA TÉCNICA DE ELECTROHILADO

Se aplica la técnica de electrospinning o electrohilado, con un voltaje constante de salida de 15,0 kV, a temperatura ambiente. La salida del fluido de aguja se mantuvo constante durante todo el procedimiento; el inyector de motor de paso A-99 Razel fue colocado a 1,73 mL/h. Los valores de humedad y temperatura se obtuvieron con el medidor de humedad, marca Habor Hab5884Y67. El valor promedio para la humedad y temperatura fueron $(68 \pm 4) \%$ y $(28,7 \pm 1,6) ^\circ\text{C}$ respectivamente.

Esta técnica tuvo una duración de dos horas para que el proceso de electrohilado se completara, ya que el mismo debió esperar que se agotara el volumen de la disolución sometida a la técnica y esto permitió obtener mejores membranas como las mostradas en la figura 3.

Figura 3.

Muestra del PVDF, con DMF/MEC como disolvente, dentro de la jeringa y lista para iniciar la técnica de Electrohilado.

**Equipo de caracterización**

Para poder identificar las propiedades de las membranas fabricadas, se realizaron técnicas de caracterización en conjunto al Laboratorio de Ciencias de los Materiales, Ingeniería y Bioingeniería de la universidad de Texas, en Dallas (USA).

En el proceso de análisis para la estructura molecular de la muestra del PVDF, que presenta modificación y la no modificada, se utilizó el Nicolet Almega XR Raman, que posee una longitud de onda laser de 780 nm (Anexo No.10). De manera similar, el análisis de XRD se obtuvo mediante el equipo Rigaku Ultima III XRD (40 kV, 44 mA, Rigaku Co. Difraccion de Rayo X, Tokyo, Japón), con una fuente Cu α , con longitud de onda 0,15418 nm. El difractor fue grabado en un rango de $2\theta = 10^\circ$ y $2\theta = 50^\circ$, donde se realizó primeramente un escaneo de $0,1^\circ$, con razón de $20^\circ/\text{min}$ para lograr calibrar y referenciar el espectro de rayo X. Posteriormente, se midió con $0,02^\circ$, con razón de $3^\circ/\text{min}$ a temperatura ambiente.

Finalmente, para determinar la morfología de las microfibras del PVDF, se caracterizó por medio del SEM, SEISS SUPRA-40, y su diámetro fue medido utilizando el programa de procesamiento de imágenes digital ImageJ, el cual es de dominio público, desarrollado por Wayne Rasband (NIH) y programado por Java.

METODOLOGÍA PARA EL ANÁLISIS DE DATA

Para obtener los diámetros de las microfibras, se utilizaron las imágenes recabadas mediante la técnica SEM. Estas, fueron analizadas con el programa ImageJ, el cual permite calibrar sus medidas, utilizando un parámetro de referencia en la imagen que se va a procesar. Luego de adquirir las medidas de los diámetros, estos se ingresaron en el programa de análisis gráfico Origin Pro (programa es producido por OriginLab Corporation y se ejecuta en Microsoft Windows), para la elaboración del histograma de frecuencia de los diámetros. Este programa, también se empleó para la construcción de la gráfica del espectro de absorbancia y de difracción, que se obtuvo con los datos de las caracterizaciones de Raman y XRD, respectivamente.

Para determinar los índices de Miller, necesarios para identificar la configuración geométrica a la cual pertenecen los sistemas cristalinos de las fases del PVDF, se utilizó el programa Full Pro-Suite. El programa, trabaja con los datos de la caracterización XRD.

El cálculo de la cantidad de fase β , que se obtuvo con las muestras fabricadas, se llevó a cabo con el programa Fityk. Este programa realiza curvas gaussianas, a las cuales se les bloquea los picos en los ángulos de difracción, previamente identificados, de las fases cristalinas del PVDF. Con las tres curvas gaussianas, el programa realiza un ajuste, que da como resultado una curva unificada corregida. Esta curva es la que se utiliza para el cálculo del área que representa la cantidad de fase piezoeléctrica β .

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se realizó una caracterización de las propiedades macroscópicas y microscópicas de las membranas fabricadas. A nivel macroscópico, se logró determinar las propiedades mecánicas de las mismas y a nivel microscópico su fase cristalina piezoeléctrica. Estas propiedades, se compararon con los resultados obtenidos por otros autores, los cuales utilizaron otros solventes de PVDF.

El MEC permitió obtener disoluciones viscoelásticas del PVDF (Figura 4), con características óptimas para la aplicación de la técnica de electrohilado, en donde se pudo apreciar que las gotas de la disolución polimérica se estiraban en la punta de la aguja, generando una forma geométrica cónica, propia del cono de Taylor dando lugar a fibras de PVDF, que se depositaban uniformemente en el colector electrificado del aparato de electrohilado.

Figura 4.
Disolución homogenizada.



Las membranas micro fibrosas de PVDF sintetizadas presentaron las siguientes características (Figura 5):

- Distribución uniforme de microfibras:
- Poca porosidad;
- Grosor estable en las muestras sintetizadas
- Resistencia a manipulaciones

Figura 5.
Recolección de la membrana formada en el proceso de Electrohilado.



CARACTERIZACIÓN MORFOLÓGICA SEM.

En las figuras 6 y 7, se presenta una comparación de las muestras que fabricamos con la disolución PVDF/DMF/MEC, y la realizada por el autor (Miranda, Boya, & Obaldía, 2021) con las disoluciones PVDF/DMF. Para las microfibras elaboradas con PVDF/DMF/MEC y DMF/PVDF se obtuvo un valor promedio, para su diámetro de (99 ± 31) nm y (104 ± 37) nm, respectivamente.

La figura 8 muestra las distribuciones del diámetro de las microfibras para las muestras elaboradas con las disoluciones PVDF/DMF/MEC y PVDF/DMF. Este análisis se realizó con la ayuda del programa ImageJ, que es un programa informático dedicado al procesamiento de imágenes en el cual se pueden medir distancias, calibrando los parámetros de medición con la escala que se puede observar en la figura anteriormente citada.

Las microfibras elaboradas con la disolución PVDF/DMF/MEC muestran distribuciones de diámetros menores a 150 nm, con una tendencia en el intervalo de diámetros comprendido entre 69 nm y 129 nm. Mientras que las microfibras que se realizaron con la disolución PVDF/DMF poseen distribuciones de hasta 200 nm, con una tendencia en el intervalo de menores de 150 nm. La disminución en el tamaño del diámetro de las microfibras se relaciona con la presencia de estructura rotacional β (Castkova K, 2020), ya que durante la aplicación del proceso de electrohilado, las fibras creadas en el campo eléctrico experimentan alteraciones en la estructura rotacional del polímero. Los resultados del SEM muestran que la disolución PVDF/DMF/MEC, provoca una disminución en el diámetro de las fibras.

Figura 6.

Muestra elaborada con la disolución PVDF/DMF/MEC

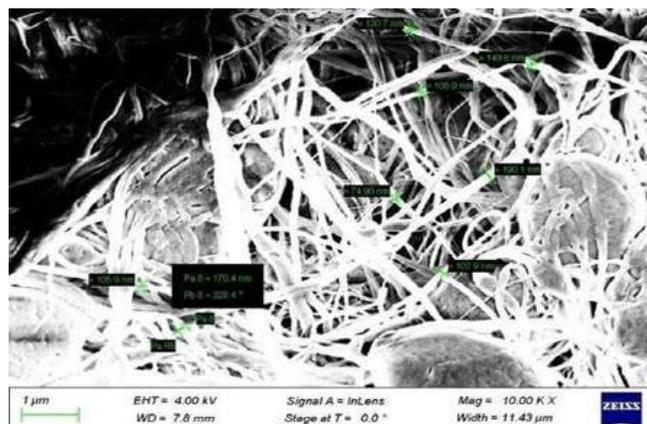


Figura 7.

Muestra elaborada con la disolución PVDF/DMF. Fuente: (Miranda, et al, 2021).

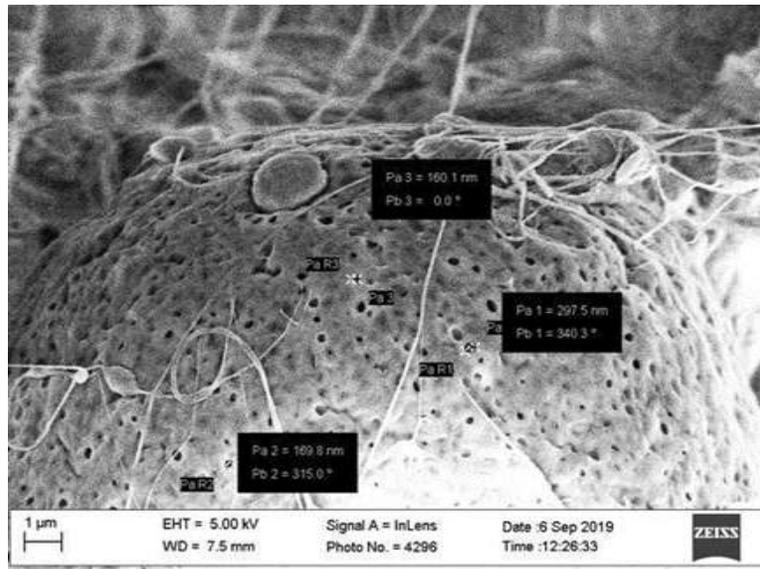
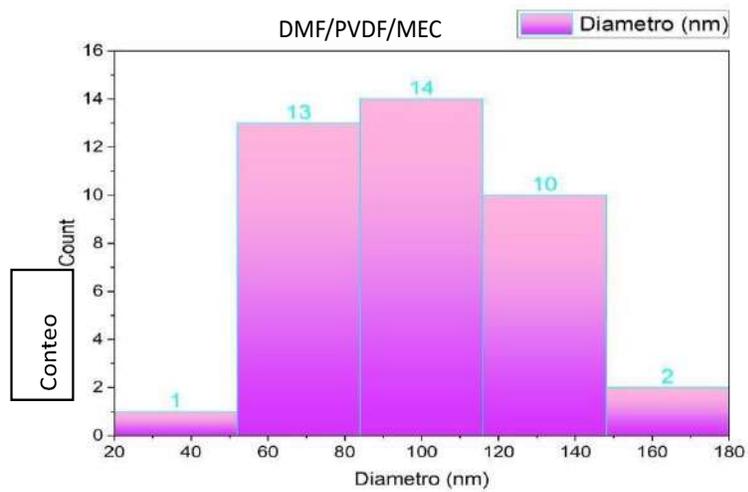


Figura 8.

Distribución de frecuencia del diámetro de las fibras (Bryden & Cuan, 2021)



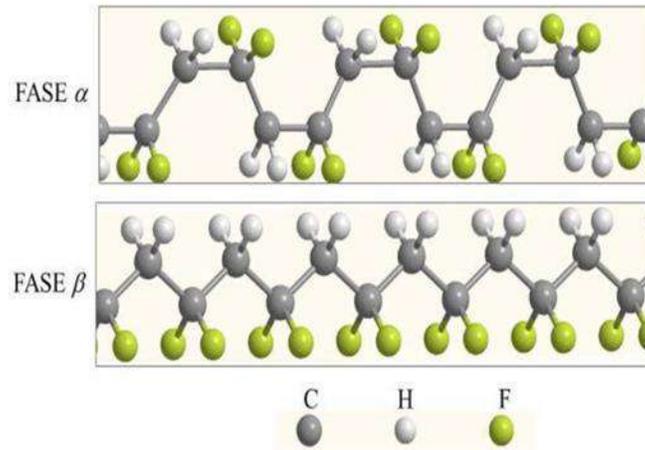
Se puede indicar que las microfibras elaboradas con la disolución PVDF/DMF/MEC muestran distribuciones de diámetros menores a 150 nm, con una tendencia en el intervalo de diámetros comprendido entre 69 nm y 129 nm. Mientras que las microfibras que se realizaron con la disolución PVDF/DMF poseen distribuciones de hasta 200 nm, con una tendencia en el intervalo de menores de 150 nm. La disminución en el tamaño del diámetro de las microfibras se relaciona con la presencia de estructura rotacional β (Castkova, 2020), ya que durante la aplicación del proceso de electrohilado, las fibras creadas en el campo eléctrico experimentan alteraciones en la estructura rotacional del polímero. Los resultados del SEM muestran que la disolución PVDF/DMF/MEC, provoca una disminución en el diámetro de las fibras.

CARACTERIZACIÓN ESTRUCTURAL POR ESPECTROSCOPIA DE RAMAN

Como se mencionó anteriormente, el PVDF se puede encontrar en cuatro diferentes fases cristalinas, α , β , γ y δ . La formación de cadenas para las fases α y β se muestran en la figura 9. La fase más común es la α , al ser la que se obtiene directamente al fundir el cristal. La conformación planar en zigzag, de la fase β , puede inducir un momento dipolar significativo (Liuxia, 2018). Las diferencias estructurales entre las fases α y β son ocasionadas por la rotación de los monómeros. Esta rotación se asocia con las distintas polaridades que distinguen a ambas fases del polímero. El espectro de Raman permite identificar las regiones que muestran los cambios en la polaridad, que son característicos de cada fase.

Figura 9.

Formación de cadenas para las fases α y β (Miranda, Boya, & Obaldía, 2021).



Los espectros de absorción para las muestras preparadas con ambas disoluciones se muestran en la figura 10 y la figura 11. Las cuales, seguimos comparándolas con las realizadas por el autor (Obaldía, Miranda, Boya, 2021)

Figura 10.

Espectro de absorción de las muestras.

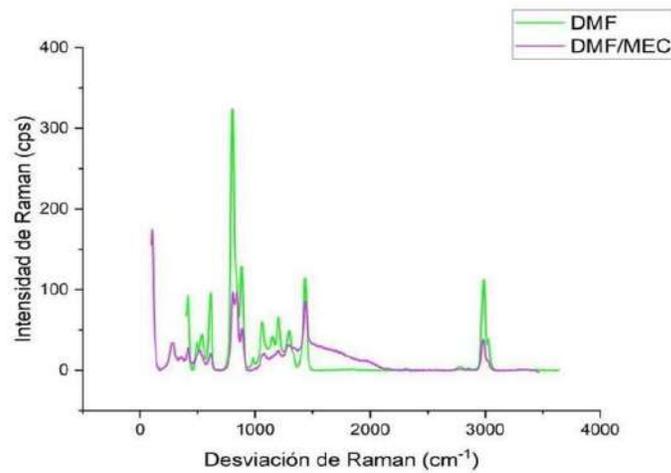
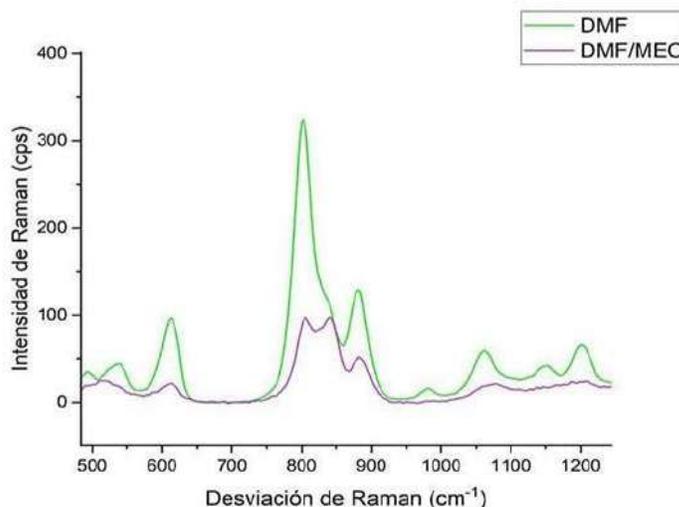


Figura 11.
Espectro ampliado de la absorbanca.



La figura 10 muestra la región de vibraciones específicas (2940 cm^{-1} a 3020 cm^{-1}) para los compuestos hidrocarburos $C = H$ (Adamo, 2021). Se presentaron bandas para las dos muestras en la región de la vecindad de 2985 cm^{-1} . La muestra de DMF/MEC comprende una banda de intensidad moderada en la región de 1600 cm^{-1} a 1710 cm^{-1} (Adamo, 2021), característica de grupo cetona. La figura 10 muestra la banda sin normalizar. Los espectros normalizados de Raman se registran en la figura 11. Se pueden identificar las bandas características de la fase α y β , 794 cm^{-1} y 839 cm^{-1} (Constantino', 2005), respectivamente. Para la muestra elaborada con DMF/MEC no tenemos una fase dominante, ya que las intensidades presentadas para la fase α y β del polímero, son similares. Las diferencias de intensidades de Raman entre ambas muestras, puede ser producto de que las concentraciones de las muestras no son las mismas, ya que este es uno de los factores que afecta este parámetro (Adamo, 2021). Estos resultados muestran que la conformación de cadenas de PVDF pasó de una fase α con formación TransGauche-Trans-Gauche (TGTG), a una fase β de formación Trans-Trans donde los átomos de hidrógeno y flúor se encuentran en lados opuestos de la columna vertebral del PVDF.

Caracterización estructural por XRD

La figura 12 muestra el espectro de difracción para la membrana fabricada con la disolución DMF/MEC. Se observan los picos difractados en $2\theta = 18, 3^\circ$ y

característicos de la fase cristalina. Mientras que el pico difractado en $20,6^\circ$ corresponde a la presencia de la fase cristalina.

Figura 12.

Espectro de difracción de la muestra con disolución DMF/MEC

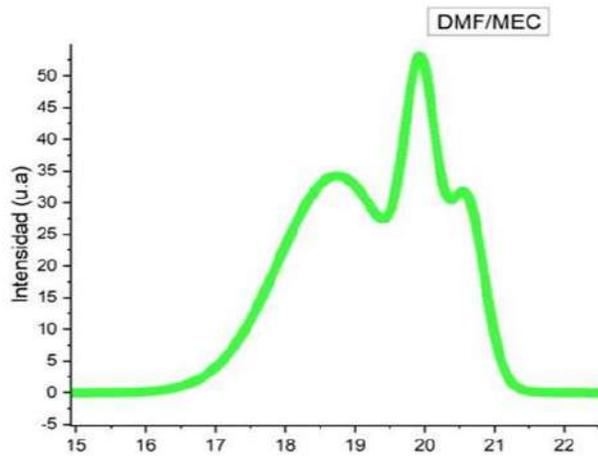


Figura 13.

XRD. Áreas calculadas de los ángulos 2θ de difracción en $18,7^\circ$, $19,9^\circ$, $20,6^\circ$ de la muestra modificada de la membrana micro fibrosa del PVDF utilizando DMF/MEC. (Bryden & Cuan, 2021)

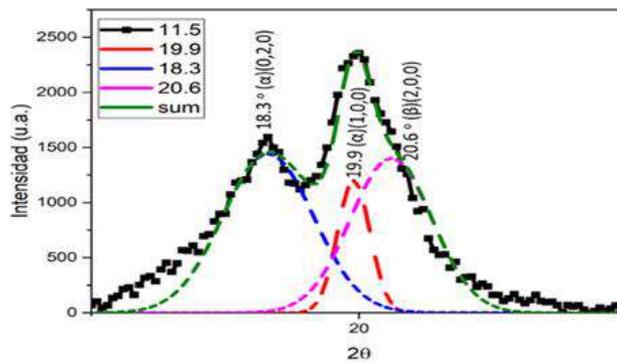
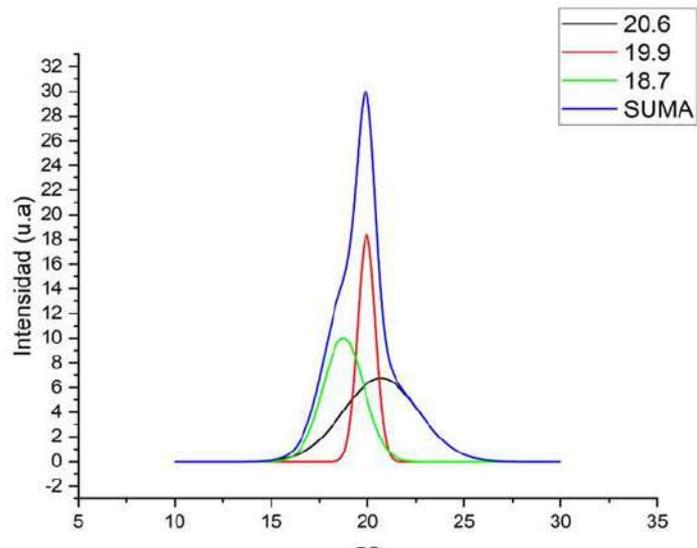


Figura 14.

XRD. Áreas calculadas de los ángulos de difracción $18,3^\circ$, $19,9^\circ$, $20,6^\circ$ de la muestra modificada de la membrana micro fibrosa del PVDF utilizando DMF/PVDF. (Obaldía, Miranda, Boya, 2021)



Para determinar geoméricamente el estado cristalino del PVDF, es usual, relacionar los parámetros de celda de unidad con el espacio de separación entre los planos de red, mediante las expresiones que se muestran la tabla 1 (Pérez, 2015).

Donde d es el espaciado entre los planos, a , b y c son los parámetros de celda de unidad, y h , k , l son los índices de Miller, β es al ángulo de la celda de unidad.

Tabla 1.
Expresiones de los sistemas cristalinos.

Tabla 1

Expresiones de los sistemas cristalinos.

Sistema cristalino	Expresión para
Monoclinico	$\frac{1}{d^2} = \frac{h^2}{a^2} + \frac{k^2}{b^2} + \frac{l^2}{c^2}$
Ortorrómico	$\frac{1}{d^2} = \frac{1}{\text{sen}^2\beta} \left(\frac{h^2}{a^2} + \frac{k^2 \text{sen}^2\beta}{b^2} + \frac{l^2}{c^2} + \frac{2hlc\cos\beta}{ac} \right)$

Donde d es el espaciado entre los planos, a , b y c son los parámetros de celda de unidad, y h , k , l son los índices de Miller, β es al ángulo de la celda de unidad.

Así se determinó mediante el software FullPro Suite los índices de Miller, los parámetros de celda de unidad y el ángulo de celda de unidad, para los sistemas cristalinos monoclinicos y ortorrómicos. Los valores de los parámetros de celda de unidades además se comprobaron a través de su cálculo. El espaciado entre los planos se obtuvo con la ecuación de la ley de Bragg. Los resultados mostrados en la tabla muestran la presencia reflexiones en plano (200), propios de las unidades de celdas ortorrómicas en fase β para el pico en $2\theta = 20,6^\circ$, y las reflexiones en los planos (020) y (100) que corresponden a las unidades de celdas monoclinicas de la fase α para los picos en $2\theta = 18,3^\circ$ y $19,9^\circ$. Estos resultados coinciden con los obtenidos del análisis de las muestras elaboradas con el DMF como disolvente (Obaldía, 2021).

El contenido de fase β presente en la muestra, se determinó, con el programa Fityk, al realizar ajustes a la región en donde se encuentran los picos de difracción de $18,7^\circ$,

$19,9^\circ$ y $20,6^\circ$. Este análisis se realizó en las membranas preparadas con la disolución DMF/MEC. El ajuste, con este programa, permitía manipular el ancho e intensidad de las curvas gaussianas, una vez fueran bloqueados los picos.

Como se pudo constatar en las figuras 13 y figura 14, se obtuvo un área de $80,6 \text{ u}^2$, para la muestra fabricada con la disolución DMF/MEC. Mientras que el resultado del área para el análisis de la muestra realizada con DMF como disolvente, fue de 4300 u^2 y $80,6 \text{ u}^2$ (Obaldía, 2021). Este resultado permite señalar que se obtuvo mayor

cantidad de estructura rotacional beta para la muestra realizada con DMF como disolvente.

CONCLUSIONES

Utilizando la técnica de electrohilado con una disolución viscoelástica constituida por DMF y MEC, con una concentración de 2,5 g de MEC por cada 5,6 g de DMF, se logró la fabricación de membranas microfibras de PVDF.

Los resultados obtenidos mediante diversas técnicas de caracterización muestran que:

1. Las membranas microfibras fabricadas poseen fase cristalina β del polímero PVDF.
2. La micrografía (SEM) de las membranas reveló formación de microfibras. Se presentaron dentro de la estructura de la microfibra algunas irregularidades que la literatura describe como *beads*.
3. El histograma de distribución de los diámetros, obtenidos mediante el análisis de imagen, mostró un diámetro de fibra de (99 ± 31) nm para la muestra elaborada con DMF y MEC como solvente; mientras que el diámetro de fibra obtenido con DMF fue de (104 ± 37) nm.
4. Mediante la técnica de espectroscopia Raman fueron detectadas vibraciones específicas de la región de los compuestos hidrocarburos, ya que se presentaron bandas en la región de vecindad de 2985 cm^{-1} , lo cual se mantiene constante en las muestras preparadas con los solventes de DMF y DMF/MEC.
5. Para la muestra elaborada con DMF/MEC se identificó una banda moderada en la región que corresponde al grupo cetona en un rango comprendido entre 1600 cm^{-1} a 1710 cm^{-1} .
6. En la muestra de DMF/MEC se observaron bandas de intensidad que permitieron la identificación de fases cristalinas α y β del polímero.
7. Las bandas de intensidad características de fases α y β en las muestras con DMF/MEC, no permitieron identificar una fase dominante debido a que registraron intensidades similares.
8. El XRD permitió identificar las formaciones geométricas del estado cristalino del polímero, Monoclínica y Ortorrómbica, en las muestras que contienen DMF y DMF/MEC.
9. La cantidad de la estructura rotacional β del polímero que se obtuvo para la muestra elaborada con DMF fue una proporción mayor a la obtenida de la muestra de DMF/MEC.

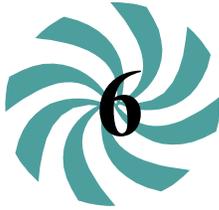
AGRADECIMIENTO

Agradecemos por su colaboración al Laboratorio de Ciencias de los Materiales, Ingeniería y Bioingeniería de la universidad de Texas, en Dallas (USA) en donde se realizaron técnicas de caracterización. Esto gracias a la Dra. Elida De Obaldía y al MSc. Daniel Villareal quienes poseen el acceso a dichos equipos. Además de a la Universidad Autónoma de Chiriquí por prestar sus instalaciones del Centro de Investigación de Física Aplicada, con el apoyo del Doctor Pablo Weigandt.

REFERENCIAS

- Adamo, T. (5 de Abril de 2021). Understanding Raman Spectroscopy Principles and Theory. Obtenido de Traces Centre: https://www.utoronto.ca/~traceslab/PDFs/raman_understanding.pdf
- Asmatulu, R., & Khan, W. S. (2019). Synthesis and Applications of Electrospun Nanofibers. Radarweg, Holanda: Elsevier.
- Billmeyer F, J. (1975). Ciencias de los polímeros. Reverté
- Castkova K, Kastyl J, Sobola D, Petrus J, Stastna E, Riha D., & Tofel P. (2020). Structure-Properties Relationship of Electrospun PVDF Fibers. *Nanomaterials (Basel)*.10(6):1221. <https://doi.org/10.3390/nano10061221>
- Duque Sánchez, L., Rodríguez, L., López M. (2013). Electrospinning: La era de las Nanofibras. *Revista Iberoamericana de Polimeros*, 14(1). <https://reviverpol.files.wordpress.com/2019/07/2013-duque.pdf>
- Liuxia Ruan, X. Y. (2018). Properties and Applications of the β Phase Poly(vinylidene fluoride) . *Polymers*, 5-32.
- Lorán, I. J. (2004). Síntesis y Caracterización de Nanofibras de Carbono para su Aplicación en la absorción de Gases Tóxicos. México: Universidad Autónoma Metropolitana.
- Nader, S., Abu Alhassan, Z., Burezq, Y., & Remya, N. (2018). Polyvinylidene Difluoride Piezoelectric Electrospun Nanofibers: Review in Synthesis, Fabrication, Characterizations,. *Journal of Nanomaterials*, 2018(1), 1-12.

- Obaldia, E., Miranda, A., & Boya, A. (2021). Síntesis y caracterización de membranas piezoeléctricas en base al polímero polifluoruro de vinilideno, utilizando la técnica de electrospinning. *I+D Tecnológico*, 17(1), 122-131. <https://doi.org/10.33412/idt.v17.1.2989>
- Pérez, J. (2015). Difracción de rayos X. Cartagena: Universidad Politécnica de Cartagena.
- Romero, J. M. (2013). Transformación de materiales termoplásticos. Editorial IC. ISBN: 978-84-15942-20-7. <https://www.iceditorial.com/operac-de-transf-de-polimeros-termoplasticos-quit0209/6088-transformacion-de-materiales-termoplasticos-uf0726-9788415942207.html>
- Ruan, L., Yao, X., Chang, Y., Zhou, L., Qin, G., & Zhang, X. (2018). Properties and Applications of the β Phase Poly(vinylidene fluoride). *Polymers*, 10(3), 228. MDPI AG. <http://doi.org/10.3390/polym10030228>
- Sánchez, L. M., Rodríguez, L., & López, M. (2013). Electrospinning: La era de las nanofibras. *Revista Iberoamericana de Polímeros*, 14(1), 10-27.



Tecnociencia, Vol. 26, N°1: 112-128

Enero-Junio 2024

ISSN L 2415-0940

**GENETIC APPROACH OF THE COIBA ISLAND HOWLER MONKEY
Alouatta coibensis coibensis FROM PANAMA, AND ITS CONSERVATION
IMPLICATIONS**

**APROXIMACIÓN GENÉTICA DEL MONO AULLADOR DE LA ISLA DE
COIBA *Alouatta coibensis coibensis* DE PANAMÁ Y SUS IMPLICACIONES
PARA LA CONSERVACIÓN**

Edgardo Díaz-Ferguson

Estación Científica Coiba (Coiba AIP), Panamá.

ediaz@coiba.org.pa

<https://orcid.org/0000-0002-2314-5021>

Carlos W. Ramos

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

laito52@yahoo.com

<https://orcid.org/0000-0003-2344-9241>

Yohanny Pineda

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

yypr29@gmail.com

<https://orcid.org/0009-0002-7939-1659>

Karol M. Gutiérrez-Pineda

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

madelinekarol@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0001-9129-7716>

Edgardo Castro-Pérez

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

hdnacastro@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0003-4884-9479>

Pedro G. Méndez-Carvajal

Universidad de Panamá, Facultad de Ciencias Naturales, Exactas y Tecnología, Departamento de Fisiología y Comportamiento Animal, Panamá.

mendez55.pm@gmail.com

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

Fecha de recepción: 1 de agosto de 2023

Fecha de aceptación: 16 de octubre de 2023

ABSTRACT

Studies on genetic diversity are key to conservation management because they may determine the resilience of primate populations under environmental and anthropogenic changes. Herein, we studied genetic diversity and connectivity in a population sample of the Coiba island howler monkey *Alouatta coibensis coibensis* from Coiba island in Panama. We collected 14 faecal samples from individuals at two sites on the northern and north-eastern sides of the island at the Gambute and Los Pozos trails, respectively. DNA was extracted from these samples, and partial sequences of cytochrome oxidase I (COI) were obtained and used as molecular markers to determine genetic diversity. Haplotypic diversity estimates ranged from 0.68 to 0.80 and from 0.0026 to 0.0041 for nucleotide diversity. Genetic connectivity based on reduced genetic distances and nonsignificant Hudson Snn test values suggests elevated connectivity between sites and the existence of a single population with good variability. Demographic history data identified positive Tajimas D as an indication of population contraction and reduced population size in this species. These results will be the baseline for establishing a better understanding of population structure, genetic health, connectivity patterns and reproductive behaviour along the largest island of the Central American Pacific. This information will allow scientists to understand and better evaluate the conservation status of this primate, confirming good availability of genetic flow even for this population living in isolation.

KEYWORDS

Genetic variability, genetic connectivity, haplotype diversity, nucleotide diversity, primates.

RESUMEN

Los estudios sobre diversidad genética son clave en el manejo de la conservación porque pueden detectar la resiliencia de la población de primates ante cambios ambientales y antropogénicos. En este trabajo estudiamos la diversidad genética y la conectividad en una muestra de la población de mono aullador *Alouatta coibensis coibensis* de isla Coiba en Panamá. Colectamos catorce muestras de heces de individuos de dos sitios del lado norte y noreste de la isla (Sendero Gambute y Los Pozos, respectivamente). Secuencias parciales del gen citocromo oxidasa I (COI) generadas a partir del DNA obtenido de esas muestras fueron utilizadas como marcador molecular para determinar la diversidad genética. Los valores de diversidad haplotípica presentaron un rango entre 0.68 y 0.80 y entre 0.0026 y 0.0041 para la diversidad de nucleótidos. La conectividad genética basada en distancias genéticas reducidas y valores estadísticos de Snn no significativos sugieren una conectividad elevada entre sitios y la existencia de una sola población con buena variabilidad. Los datos de la historia demográfica mostraron un Tajimas D positivo como un indicativo de la contracción y tamaño reducido de la población de esta especie. Estos resultados serán la base para una mejor comprensión de la estructura poblacional, salud genética, patrones de conectividad y comportamiento reproductivo a lo largo de la isla más grande del Pacífico Centroamericano. Esta información permitirá a los científicos, comprender y evaluar mejor el estado de conservación de este primate, confirmando una buena disponibilidad de flujo genético incluso para esta población que vive aislada.

PALABRAS CLAVES

Variabilidad genética. conectividad genética. diversidad haplotípica. diversidad nucleotídica. Primates.

INTRODUCTION

Studies on genetic diversity are key to conservation management because they may determine the resilience of primate populations under environmental and anthropogenic changes (Melo-Carrillo *et al.* 2020). Genetic diversity studies are needed to understand population fitness, population changes, connectivity, and effective population size to detect inbreeding, as isolation leads to changes at the evolutive and behavioural levels (Hughes *et al.* 2008; Milton *et al.* 2009; Reed *et al.* 2002). Few genetic studies have been performed on different species from the *Alouatta* genus facing isolation conditions. However, populations of *Alouatta palliata mexicana* at Selva Zoque in Mexico exhibited low genetic diversity when sequencing of mitochondrial genes from 45 individuals was conducted (Dunn *et al.* 2014). Low genetic variation has also been observed in *A. palliata palliata* from Costa Rica and Panama and in *A. pigra* in Guatemala, whereas studies in *A. seniculus*, *A. belzebuth* and *A. fusca* from Brazil have shown that the Amazonian-located species exhibit higher genetic variability than Mesoamerican species (Cortés-Ortiz *et al.* 2003; Zaldivar *et al.* 2003). These results may be related to biogeographical scenarios, founder effects or bottle neck effects related to dispersion capability (Milton *et al.* 2009).

In Panama, the Coiba Island howler monkey has been described as an endemic species and includes two subspecies: *Alouatta coibensis coibensis* and *Alouatta coibensis trabeata*. *Alouatta coibensis coibensis* is restricted to Coiba and Jicaron Islands, concentrating the only two populations for this taxon as a continental island species (Froehlich & Froehlich 1987; Méndez-Carvajal 2019a; Milton & Mittermeier 1977; Rylands *et al.* 2008; Thomas 1902). The Azuero howler monkey, *A. c. trabeata*, is located at the Azuero peninsula, including areas of Herrera, Los Santos, and Veraguas provinces (Méndez-Carvajal 2013). Both subspecies have been declared endangered by the International Union for Conservation of Nature (IUCN) (Cuarón *et al.* 2020; Méndez-Carvajal *et al.* 2021). Each subspecies lives under different habitat conditions; *A. c. coibensis* is restricted to islands, and *A. c. trabeata* is found on the mainland and lives in forest patches with incremental habitat fragmentation due to agricultural and cattle activities, compromising their population gene flow. Previous studies from Fundación Pro-Conservación de los Primates Panameños (FCPP) have been monitoring the Coiba Island howler's populations as a long-term project since 2009 to

the present, calculating 472 individuals and a group size average of 4.3 ind/groups, with 109 groups for the island comprising a habitat size of 504 km² (Méndez-Carvajal 2012; Méndez-Carvajal 2019). Additionally, the group structure for this species tends to have only one or two males per group (unimale-multifemale), which is different from *A. palliata*, which has 4 to 6 males and larger groups (multimale-multifemale) (Méndez-Carvajal 2012; Méndez-Carvajal 2019). The average group size observed represents the smaller reported for an *Alouatta* species, and genetic diversity studies are required to better understand their populations and any possible inbreeding effect due to isolation. As social structure has a significant effect on genetic variation (Smouse *et al.* 1981), our aim was to describe the genetic diversity of *A. c. coibensis* and to evaluate the implications for its conservation. Due to geographic isolation from the mainland of this species, low genetic diversity is expected (Jensen *et al.* 2013). In this study, the genetic diversity, connectivity, and demographic history of the species were briefly analysed. Understanding genetic diversity and connectivity is essential for evaluating isolation effects and other factors that have been suggested to affect population structure, such as low reproductive success, low food quality, and inbreeding (Méndez-Carvajal 2012; Oklander *et al.* 2017). These data will provide useful information for future studies of the connectivity and phylogeography of *A. coibensis*, together with demographic studies, will add relevant information concerning the variability of haplotype composition and phylogenetic relationships of Mesoamerican howler monkeys, providing information that could be comparable to other primate species living under similar habitat conditions and for conservation purposes.

METHODS

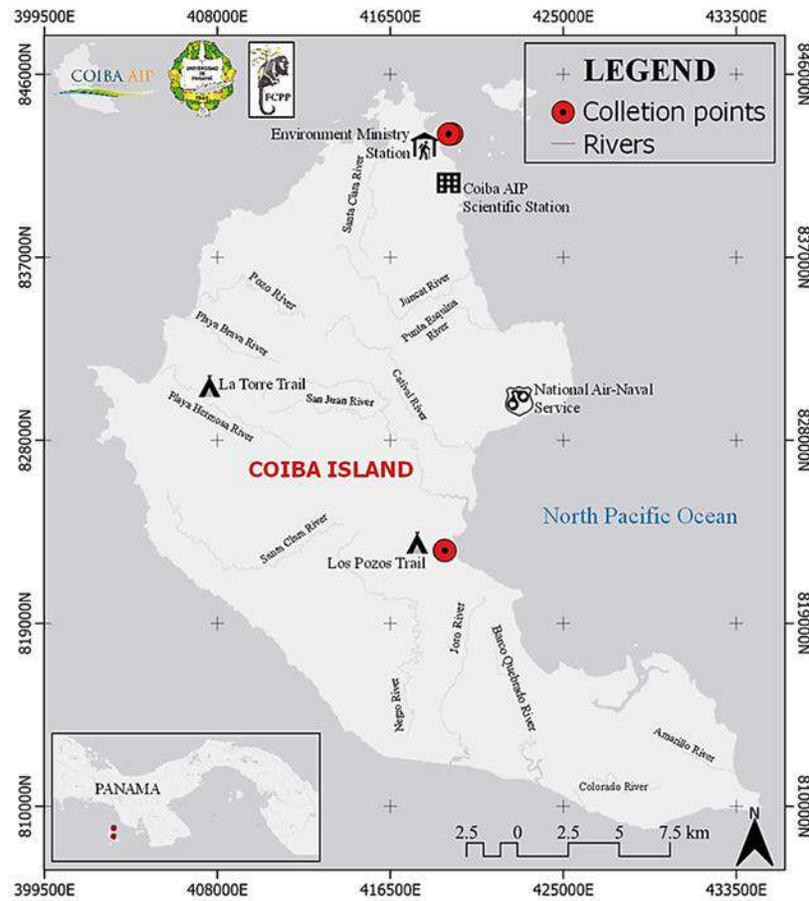
Study site

Coiba Island is located on the Pacific side of Panama 24 km off the southwest coast of Veraguas Province, Panama. The island was a penal colony from 1919 to 2004, with 85% of land covered by Humid Tropical Forest (Ibañez 2011; Méndez-Carvajal 2019b). The canopy height reaches 50 m, mostly with tree species reported as suitable for the only two species of primates that inhabit this island (howler and capuchin monkeys *Cebus imitator*) (Méndez-Carvajal 2012).

The maximum elevation is 200 m.a.s.l., with 24 to 26 °C as a rank for temperature and annual precipitation of 3,403 mm (Ibañez 2011). To identify the groups of interest and collect the faecal samples, we used groups previously monitored from Gambute at the Environmental Ministry Station (N 07°37' 34 7"; W 81° 43' 46 9") and Los Pozos (N 07°26' 25 8"; W 81° 43' 55 5") (Figure 1).

Figure 1.

Study area, Coiba Island, Republic of Panama. Red dots show the sampling areas. Gambute location is marked as Environment Ministry Station.



Sample collection

Faecal samples from *A. c. coibensis* were collected immediately after defecation, deposited into plastic bags or vials containing 75% ethanol and stored in an icebox cooler. We recorded the date, hour, sex and, if possible, approximate age of the animal as recommended by Goossens *et al.* (2011) (Table I). Samples were subsequently transported for DNA extraction from Coiba Island to the Laboratory of Genetics and Molecular Biology of the University of Panama.

Table 1.*Study animals, locations, and time of fecal collection.*

No. Sample	Species code	Sex	Coordinates	Study site	Date	Time
1	A.c.c-001	AM	N 07°37'34.7" W 81°43'46.9"	G	July 17, 2019	15:00
2	A.c.c-002	AM	N 07°37'34.7" W 81°43'46.9"	G	July 17, 2019	15:18
3	A.c.c-003	AF	N 07°37'34.7" W 81°43'46.9"	G	July 17, 2019	15:19
4	A.c.c-004	AF	N 07°37'34.7" W 81°43'46.9"	G	July 17, 2019	11:10
5	A.c.c-005	AF	N 07°37'34.7" W 81°43'46.9"	G	July 17, 2019	15:00
6	A.c.c-006	AF	N 07°37'34.7" W 81°43'46.9"	G	July 17, 2019	15:00
7	A.c.c-007	AM	N 07°26'22.7" W 81°43'55.7"	L P	August 19, 2019	09:26
8	A.c.c-008	AM	N 07°26'25.8" W 81°43'55.5"	L P	August 19, 2019	09:26
9	A.c.c-009	JF	N 07°26'25.8" W 81°43'55.5"	L P	August 19, 2019	14:46
10	A.c.c-010	JF	N 07°26'25.8" W 81°43'55.5"	L P	August 19, 2019	14:46
11	A.c.c-011	AF	N 07°26'25.8" W 81°43'55.5"	L P	August 19, 2019	15:00
12	A.c.c-012	AF	N 07°26'25" W 81° 43' 55.6"	L P	August 19, 2019	16:00
13	A.c.c-013	AF	N 07°26'25" W 81°43'55.6"	L P	August 19, 2019	16:00
14	A.c.c-014	AM	N 07°26'25" W 81°43'55.6"	L P	August 19, 2019	16:00

Note: A.c.c.=*Alouatta coibensis coibensis*; AF=Adult female; AM=Adult male; JF=Juvenile female; G=Gambute; LP=Los Pozos.

DNA extraction, COI amplification, sequencing, and alignment

DNA was extracted using the E.Z.N.A.® Stool DNA kit (Omega Bio-Tek Inc., Georgia USA). The concentration of DNA was evaluated spectrophotometrically using a Nanodrop, and the quality was verified electrophoretically. A 658 bp fragment of the COI region was amplified by PCR using the universal primers LCO 1490 (5'-GGT CAA CAAATC ATA AAG ATA TTG G-3') and HCO 2198 (5'-TAA ACT TCA GGG TGA CCA AAA AAT CA-3') (Folmer *et al.* 1994). The DNA amplification reaction was performed in 30 µL reaction volumes containing 15 µL 2X PCR Master mix (Omega Bio-Tek), 2 µL of DNA template (50 ng), 1 µL (0.33 µM) of each primer and 11 µL of nuclease-free ddH₂O. PCR thermal cycler conditions consisted of initial denaturation at 94 °C for 3 min followed by 35 cycles at 94 °C for 30 s, 52 °C for 45

s, 72 °C for 45 s and a final extension at 72 °C for 3 min. The PCR products of expected size were evaluated by electrophoresis in 1% agarose gels in 1X TAE buffer and stained with GelRed. PCR products were shipped to Psomagen (USA) for purification and bidirectional sequencing using the same universal primers with a BigDye Terminator 3.1 kit (Applied Biosystems, USA). Sequences were assembled, edited, aligned, and trimmed using SEQUENCHER 5.4.6 software (Gene Codes Corporation, Ann Arbor, MI, USA). The final obtained sequences were compared to the GenBank (BLAST) and Barcode of Life Data System (BOLD) databases to determine the identity of each sequence.

Ethical approval and declaration of conflicts

Samples were collected in accordance with the ethical approval of the Environmental Ministry of Panama, based on scientific permit SE/APH-1-2019.

Data availability

The DNA sequence datasets generated during and/or analysed during the current study are available in the GenBank repository, [<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/genbank/>] with the following accession numbers: MZ636576-MZ636589

Genetic diversity

We calculated haplotype number (h), haplotype diversity (Hd), polymorphic sites (S) and nucleotide diversity (π) using DnaSP v.5 (Librado & Rozas 2009). The haplotype network was constructed with the POPART software package (Leigh & Bryant 2015) using the TCS method (Clement *et al.* 2002). We applied the Tajimas D test to examine equilibrium between mutations (Tajimas 1989), and for demographic history and distances, we used Hudson Snn tests (Hudson 2000).

RESULTS

Sequence identity

Searches for sequence identity in GenBank revealed that all sequences generated in this study exhibited the highest percentages of identity (94%) with COI sequences from individuals identified as *Alouatta guariba*. Similar results were obtained using BOLD with the closest similarity of 93.26 with *Alouatta guariba* reference sequences, indicating the lack of COI sequences of the *Alouatta* species studied here in both databases. However, although there are no COI sequences for *A. coibensis* or *A. palliata* deposited in GenBank or BOLD, the highest percentages of identity or similarity for the sequences generated from our specimens matched sequences of the genus *Alouatta*.

Genetic diversity

A total of nine variable sites ($S = 9$) and six haplotypes were identified from 14 sequences. Haplotype diversity (Hd) was 0.73, and nucleotide diversity (π) was 0.0038 (Table II). Regarding genetic connectivity and demographic history, the results yielded a negative Tajimas D value of -1.125 ($p > 0.053$) for Los Pozos. Meanwhile, positive D values were observed for Gambute with $D=0.83$. The results from these two locations were not significantly different ($p>0.05$). The genetic distance between the two locations was reduced ($GST=0.0086$) with no significant genetic differentiation (Table II; Figure 2). The genetic distance using the Hudson test (Da) was 0.0094, which was not significant, revealing no evidence of genetic differentiation (Table 2).

Table 2.

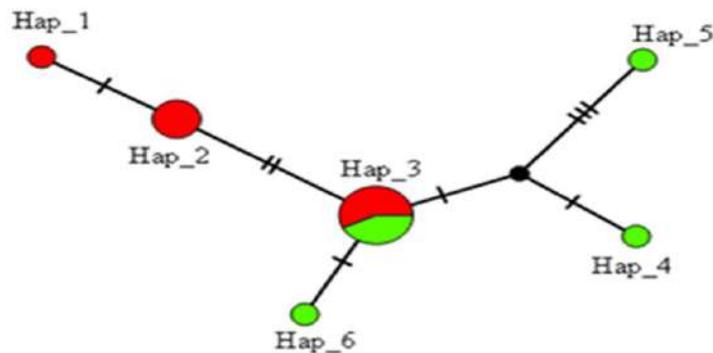
Genetic diversity parameters and accession numbers for the two analyzed populations.

Site	N	H	Hd	π	Snn	Da	AN
G	8	3	0.68	0.0026	$p>0.05$	0.0094	MZ636576-80 MZ636587-89
LP	6	4	0.80	0.0041			MZ636581-86

Note: G= Gambute; N=number of sequences; H= Haplotype number; Hd= Haplotype diversity; π = nucleotide diversity; Snn=Hudson (2000) genetic differentiation statistic between locations; Da= genetic distance; AN= GenBank accession number.

Figure 2.

TCS haplotype network. The size of the circles is proportional to the haplotype frequency. Black dots represent unsampled or missing haplotypes. Red and green colours correspond to sites where the sequences were obtained. Red: Gambute. Green: Los Pozos. Short bars represent mutational steps between haplotypes.



DISCUSIÓN

Sequence identity

The taxonomic status of *Alouatta coibensis* is controversial and has been poorly studied at the genetic level (Groves, 2001; Rylands *et al.*, 1997). Regardless of the taxonomic status identity of specimens from Coiba, there were no previous COI sequences to compare in GenBank; therefore, our data for *A. c. coibensis* were deposited, contributing new information on the genetics of this species. Genetic characterization of this species is beneficial for unravelling gene flow patterns, understanding taxonomy and establishing better conservation practices (Rylands *et al.* 2006). In addition, genetic similarities between our *A. c. coibensis* sequences and *A. guariba* sequences in GenBank (94% similarity) support previous inferences regarding social and group structure similarities between the two species (Méndez-Carvajal 2012; Milton & Mittermier 1977). Although the IUCN considers this subspecies with synonymous names, some authors suggests that genetic data base for *A.coibensis* should be improved with more genetic studies (Cortés-Ortiz *et al.* 2003; Ruíz-García *et al.* 2017).

Genetic diversity

The TCS haplotype network revealed that individuals from the same locality were separated by fewer mutational steps than haplotypes from different localities (Fig. 2). Most of the haplotypes were singletons, except for haplotypes 2 and 3. Haplotypes 1 and 2 were present only in Gambute, while haplotypes 4, 5 and 6 were only present in Los Pozos. Haplotypes 4 and 5 are connected by a black node representing a missing intermediate haplotype. Gambute (Environment Ministry Station) exhibited the highest number of unique haplotypes compared to Los Pozos. Haplotype 3 was the most frequent haplotype and was directly connected to two of the remaining five haplotypes. This haplotype is present in 7 of the fourteen individuals sampled and is the only haplotype shared by individuals from both localities. The number of mutational steps among haplotypes of Los Pozos was higher (1-7) than among haplotypes from Gambute (1-4).

Genetic diversity in members of the *Alouatta* genus has been estimated using different molecular markers, including isozymes, restriction fragment profiles of mtDNA, microsatellites and nuclear and mitochondrial gene sequences (Barroso *et al.* 1988, Goncalves *et al.* 2004, James *et al.* 1997, 2008, Nascimento *et al.* 2005). Isozyme analysis of 14 loci in *Alouatta palliata* from Costa Rica displayed no variation and low genetic diversity compared to *A. seniculus* and *A. belzebul* from Brazil (Zaldivar *et al.* 2003). Populations of *Alouatta palliata* located in northern latitudes exhibit less genetic diversity than populations located in South America (Cortés-Ortiz *et al.* 2003; Ford

2006). In the case of *A. c. coibensis*, the data reported here are similar to the diversity patterns observed in South American species of the genus *Alouatta*, with a higher diversity compared to the data obtained from *A. palliata* and other species of the genus in Mesoamerica. However, the overall haplotypic and nucleotide diversity values for *A. c. coibensis* were consistent with the results obtained from COII in 124 individuals of *A. palliata* from different Latin American countries, with H_d values of 0.674 and π of 0.0038 (Ruíz-García *et al.* 2017), but lower than those observed in *A. belzebul* from Amazonian and Atlantic forests (Nascimento *et al.* 2008) and *A. caraya* from the Argentina and Paraguay populations (Ascunce 2007). The diversity values exhibited by individuals from *A. c. coibensis* were considerably higher than values obtained from mitochondrial control region sequences of *A. p. mexicana*, an endangered species inhabiting Selva Zoque, one of the largest tropical rainforests in northern Mexico (Cuarón *et al.* 2020; Dunn *et al.* 2014). Previous reports indicate that in general, island populations generally exhibit lower levels of genetic diversity than their mainland counterparts due to isolation, small size and increased inbreeding isolation, small size and increased inbreeding (Frankham 1997; De la Rúa *et al.* 2001; Jensen *et al.* 2013; Miller 2010). Compared to other species, *A. c. coibensis*, although with a small population size, exhibits increased genetic diversity even with other species that show similar habitat conditions, such as the Japanese macaque *Macaca fuscata*, which inhabits a Japanese island with a similar surface to Coiba's (504.9 km²) but with a higher population density (Hayaishi & Kawamoto 2006; Méndez-Carvajal 2012). Comparing the genetic diversity values of *A. c. coibensis* populations to the endangered proboscis monkey *Nasalis larvatus* from Southeast Asia, our data revealed higher levels of genetic diversity for Coiba's populations. Coiba is the largest island on the Pacific coast of Mesoamerica, and it is uninhabited (except for small-size scientific research and national security stations) with a mature and little-altered rainforest (Méndez-Carvajal, 2019b; Milton & Mittermier, 1977). The island is considered a natural sanctuary with few natural predators (and hunting is not allowed) and without geographic barriers that reduce the free movement of individuals among groups within the island (Méndez-Carvajal 2002; Mittermier & Milton 1978). These habitat conditions may explain the relatively higher values of genetic diversity for *A. c. coibensis* compared to other limited habitats for island populations. Additionally, the levels of genetic diversity observed in Coiba island howler monkeys could be the result of the early dispersal of males to other groups or the result of several early migratory waves that populated the island causing a relatively highly diverse founder effect; however, there is currently no evidence on this type of dispersal pattern. The differences in genetic diversity observed between collection sites with greater genetic diversity in Los Pozos than Gambute may represent differences among two putative demes in which exchange of individuals occurs.

Genetic connectivity and demographic history

Genetic connectivity data are essential for understanding dispersal behaviour and other historical and contemporary processes that determine population structure (Oklander *et al.* 2017). Therefore, the lack of genetic differentiation among *A. c. coibensis* populations evidenced connectivity and no isolation within the northern section of the island. Based on demographic history and overall negative D values, we infer a population expansion for *A. c. coibensis* in the northern section of Coiba Island.

The genetic diversity of *A. c. coibensis* was moderate to high, even in an isolated environment. These findings and the observed connectivity indicate that *A.c. coibensis* is not inbreeding and demonstrates the viability of the species by gene flow. Studies of sex-biased dispersal are necessary to evaluate the possibility that the observed genetic diversity in small populations, such as Coiba Howler monkeys, is related to female philopatry. As a part of the FCPP's long-term research, we are expanding knowledge using different aspects of the *A. c. coibensis* ecology, including studying parasitology and chemistry ecology in their diet from other sites of Coiba, to better understand this primate in a long term and to apply conservation practices before tourism and other anthropogenic effects evolve in the future.

ACKNOWLEDGEMENTS

We would like to thank Fundación Pro-Conservación de los Primates Panameños (FCPP), University of Panama VIP-CEIP-01-04-06-2019-11 funds, and Coiba Scientific Station (COIBA AIP) for providing funds and equipment for this project. We also want to thank the Laboratory of Genetics and Molecular Biology of the University of Panama and the Environmental Ministry of Panama for their support during the sampling collection, sampling permits and transportation logistics between sites within Coiba National Park. E. C. P. is supported by Sistema Nacional de Investigación (SNI), Secretaría Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación (SENACYT), Panamá.

REFERENCIAS

- Ascunce, M. S., Hasson, E., Mulligan, C. J., & Mudry, M. D. (2007). Mitochondrial sequence diversity of the southernmost extant New World monkey, *Alouatta caraya*. *Molecular Phylogenetics and Evolution*, 43(1), 202–215.
<https://doi.org/10.1016/j.ympev.2006.10.004>
- Barroso, C.M.L., Sampaio, M.I.C., Schneider, M.P.C., Hamel, A.R., Salzano, F.M. & Seuánez, H.N. (1988). Adenosine deaminase isozyme variation in *Alouatta*

- belzebul* with review data from other primates. *Rev Bras Genet*, 11, 643–652. <https://pesquisa.bvsalud.org/portal/resource/pt/lil-65438>
- Clement, M., Snell, Q., Walker, P., Posada, D., & Crandall, K. (2002). TCS: estimating gene genealogies. In Parallel and Distributed Processing Symposium, International. *IEEE Computer Society*, 3, 0184–0184. <https://ieeexplore.ieee.org/document/1016585>
- Concalves, E. C., Silva, A., Barbosa, M. S., & Schneider, M. P. (2004). Isolation and characterization of microsatellite loci in Amazonian red-handed Howlers *Alouatta belzebul* (primates, Platyrrhini). *Molecular Ecology Notes*, 4(3), 406–408. <https://doi.org/10.1111/j.1471-8286.2004.00667.x>
- Concalves, E. C., Ferrari, S.F., Medeiros, D.S.L., Silva, A. & Schneider, M.P.C. (2008). Long term variation in the genetic diversity of red-handed howlers *Alouatta belzebul* (Primates, Platyrrhini) from eastern Brazilian Amazonia, in Ferrari SF, Rimoli J (eds): A Primatologia no Brasil.(Sociedade Brasileira de Primatologia, Aracaju). *A Primatologia no Brasil*, 25. <http://www.biologiageralexperimental.bio.br/edicoes/primata/livro.pdf#page=25>
- Cortés-Ortiz, L., Bermingham, E., Rico, C., Rodríguez-Luna, E., Sampaio, I., & Ruiz-Garcia, M (2003). Molecular systematics and biogeography of the Neotropical monkey genus, *Alouatta*. *Molecular Phylogenetics and Evolution*, 26(1), 64-81.
- Cuarón, A.D., Shedden, A., Rodríguez-Luna, E., de Grammont, P.C. & Link, A. (2020). *Alouatta palliata* ssp. *mexicana*. The IUCN Red List of Threatened Species 2020: e. T925A17978896. <https://dx.doi.org/10.2305/IUCN.UK.2020-2.RLTS.T925A17978896>
- Dunn, J. C., Shedden-González, A., Cristóbal-Azkarate, J., Cortés-Ortiz, L., Rodríguez-Luna, E., & Knapp, L. A. (2013). Limited genetic diversity in the critically endangered Mexican howler monkey (*Alouatta palliata mexicana*) in the Selva Zoque, Mexico. *Primates*, 55(2), 155–160. <https://doi.org/10.1007/s10329-013-0399-6>
- De La Rúa, P., Galián, J., Serrano, J., & Moritz, R. F. (2001). Genetic structure and distinctness of *Apis mellifera* L. populations from the Canary Islands. *Molecular Ecology*, 10(7), 1733–1742. <https://doi.org/10.1046/j.1365-294x.2001.01303.x>

- Groves, C. P. 2001. Primate taxonomy. Smithsonian Institution Press.
- Folmer, R. H. A., Nilges, M., Folkers, P. J. M., Konings, R. N. H., & Hilbers, C. W. (1994). A model of the complex between single-stranded DNA and the single-stranded DNA binding protein encoded by gene V of filamentous bacteriophage M13. *Journal of Molecular Biology*, 240(4), 341–357. <https://doi.org/10.1006/jmbi.1994.1449>
- Frankham, R. (1997). Do island populations have less genetic variation than mainland populations? *Heredity*, 78(3), 311–327. <https://doi.org/10.1038/hdy.1997.46>
- Froehlich, J. W., & Froehlich, P. H. (1987). The status of Panama's endemic howling monkeys. *Primate Conserv*, 8, 58-62.
- Ford, S. M. (2006). The biogeographic history of Mesoamerican primates. In *New perspectives in the study of Mesoamerican primates*. Springer, Boston, MA, USA, 81-114.
- Goossens, B., Anthony, N., Jeffery, K., Johnson-Bawe, M., & Bruford, M. W. Field and laboratory methods in primatology Cambridge University Press, Cambridge, UK, 371-386.
- Hayashi, S., & Kawamoto, Y. (2006). Low genetic diversity and biased distribution of mitochondrial DNA haplotypes in the Japanese macaque (*Macaca fuscata yakui*) on Yakushima Island. *Primates*, 47(2), 158–164. <https://doi.org/10.1007/s10329-005-0169-1>
- Hudson, R. R. (2000). A new statistic for detecting genetic differentiation. *Genetics*, 155(4), 2011–2014. <https://doi.org/10.1093/genetics/155.4.2011>
- Hughes, A. R., Inouye, B. D., Johnson, M. T., Underwood, N., & Vellend, M. (2008). Ecological consequences of genetic diversity. *Ecology Letters*, 11(6), 609–623. <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2008.01179.x>
- Ibáñez, A. (2011). Guía botánica del Parque nacional Coiba. International Cooperative Biodiversity Groups: Instituto Smithsonian de Investigaciones Tropicales: Secretaría Nacional de Ciencia Tecnología e Innovación (SENACYT).

- James, R. A., Leberg, P. L., Quattro, J. M., & Vrijenhoek, R. C. (1997). Genetic diversity in black howler monkeys (*Alouatta pigra*) from Belize. *American Journal of Physical Anthropology*, 102(3), 329–336. [https://doi.org/10.1002/\(sici\)1096-8644\(199703\)102:3<329::aid-ajpa3>3.0.co;2-q](https://doi.org/10.1002/(sici)1096-8644(199703)102:3<329::aid-ajpa3>3.0.co;2-q)
- Jensen, H., Moe, R., Hagen, I. J., Holand, A. M., Kekkonen, J., Tufto, J., & Saether, B.-E. (2013). Genetic variation and structure of house sparrow populations: Is there an island effect? *Molecular Ecology*, 22(7), 1792–1805. <https://doi.org/10.1111/mec.12226>
- Leigh, J. W., & Bryant, D. (2015). popart: Full-feature software for Haplotype Network Construction. *Methods in Ecology and Evolution*, 6(9), 1110–1116. <https://doi.org/10.1111/2041-210x.12410>
- Librado, P., & Rozas, J. (2009). DnaSP V5: A software for comprehensive analysis of DNA polymorphism data. *Bioinformatics*, 25(11), 1451–1452. <https://doi.org/10.1093/bioinformatics/btp187>
- Melo-Carrillo, A., Dunn, J. C., & Cortés-Ortiz, L. (2020). Low genetic diversity and limited genetic structure across the range of the critically endangered Mexican howler monkey (*Alouatta palliata mexicana*). *American Journal of Primatology*, 82(8). <https://doi.org/10.1002/ajp.23160>
- Méndez-Carvajal, P.G. (2002). Coiba Island, Panama. *Neotropical Primates*, 10(3), 163. <http://static1.1.sqspcdn.com/static/f/1200343/18197701/1337026095787/NP10.3.pdf?token=%2BZ7lkt7PziHkKn84f7muZSOEXEc%3D>
- Méndez-Carvajal, P.G. (2012). Population Study of Coiba Howler Monkeys (*Alouatta coibensiscoibensis*) and Coiba Capuchin Monkeys (*Cebus capucinus imitator*), Coiba Island National Park, Republic of Panama. *Journal of Primatology*, 01(2), 104. <https://doi.org/10.4172/2167-6801.1000104>
- Méndez-Carvajal, P. G. (2013). Population size, distribution and conservation status of howler monkeys (*Alouatta coibensis trabeata*) and spider monkeys (*Ateles geoffroyi azuerensis*) on the Azuero Peninsula, Panama. *Primate Conservation*, 26(1), 3–15. <https://doi.org/10.1896/052.026.0107>

- Méndez-Carvajal, P.G. (2019a). A long-term monitoring study to evaluate the primate conservation status in Panama using species distribution modelling and complementary information (Doctoral dissertation, Durham University). http://etheses.dur.ac.uk/13393/1/Me%CC%81ndez-Carvajal_PM_Thesis.pdf?DDD5+
- Méndez-Carvajal, P.G. (2019b). An update on the Coiba howler monkey, Coiba Island, Panamá. *Neotropical Primates*, 25 (1), 59-60. http://static1.1.sqspcdn.com/static/f/1200343/28298511/1589414924580/NP_25.1_Mendez_Update_Coiba_howler_pp.59-60.pdf?token=zLY%2B14ZCXXKby3jSOiUV0bcMSoV8%3D
- Méndez-Carvajal, P.G., Cuarón, A.D., Shedden, A., Rodríguez-Luna, E., de Grammont, P.C. & Link, A. 2021. *Alouatta palliata ssp. coibensis* (amended version of 2020 assessment). The IUCN Red List of Threatened Species 2021: e.T43899A195441006. <https://dx.doi.org/10.2305/IUCN.UK.20211.RLTS.T43899A195441006>
- Milton, K., & Mittermeier, R. A. (1977). A brief survey of the primates of Coiba Island, Panama. *Primates*, 18(4), 931–936. <https://doi.org/10.1007/bf02382942>
- Milton, K., Lozier, J. D., & Lacey, E. A. (2008). Genetic structure of an isolated population of mantled howler monkeys (*Alouatta palliata*) on Barro Colorado Island, Panama. *Conservation Genetics*, 10(2), 347–358. <https://doi.org/10.1007/s10592-008-9584-3>
- Miller, H.C., Allendorf, F., & Daugherty, C.H. (2010). Genetic diversity and differentiation at MHC genes in island populations of tuatara (*Sphenodon* spp.). *Molecular Ecology*, 19(18), 3894–3908. <https://doi.org/10.1111/j.1365-294x.2010.04771.x>
- Mittermeier, R. A., & Milton, K. (1978). Proposal for an Island National Park in Panama. *Oryx*, 14(04), 343. <https://doi.org/10.1017/s003060530001591x>
- Nascimento, F. F., Bonvicino, C. R., da Silva, F. C. D., Schneider, M. P. C., & Seuánez, H. N. (2004). Cytochrome *b* polymorphisms and population structure of two species of *Alouatta* (primates). *Cytogenetic and Genome Research*, 108(1-3), 106–111. <https://doi.org/10.1159/000080808>

- Nascimento, F. F., Bonvicino, C. R., de Oliveira, M. M., Schneider, M. P. C., & Seuánez, H. N. (2008). Population Genetic Studies of *Alouatta belzebul* from the Amazonian and Atlantic forests. *American Journal of Primatology*, 70(5), 423–431. <https://doi.org/10.1002/ajp.20507>
- Oklander, L. I., Miño, C. I., Fernández, G., Caputo, M., & Corach, D. (2017). Genetic structure in the southernmost populations of black-and-gold howler monkeys (*Alouatta caraya*) and its conservation implications. *PLOS ONE*, 12(10). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0185867>
- Smouse, P. E., Vitzthum, V. J., & Neel, J. V. (1981). The impact of random and lineal fission on the genetic divergence of small human groups: A case study among the yanomama. *Genetics*, 98(1), 179–197. <https://doi.org/10.1093/genetics/98.1.179>
- Reed, D. H., Lowe, E. H., Briscoe, D. A., & Frankham, R. (2003). Fitness and adaptation in a novel environment: Effect of inbreeding, prior environment, and lineage. *Evolution*, 57(8), 1822. <https://doi.org/10.1554/02-601>
- Ruiz-García, M., Cerón, Á., Sánchez-Castillo, S., Rueda-Zozaya, P., Pinedo-Castro, M., Gutierrez-Espeleta, G., & Shostell, J. M. (2017). Phylogeography of the mantled howler monkey (*Alouatta palliata*; Atelidae, primates) across its geographical range by means of mitochondrial genetic analyses and new insights about the phylogeny of Alouatta. *Folia Primatologica*, 88(5), 421–454. <https://doi.org/10.1159/000480502>
- Rylands, A. B., Mittermeier, R. A., & Rodríguez-Luna, E. (1997). Conservation of neotropical primates: Threatened species and an analysis of primate diversity by country and Region. *Folia Primatologica*, 68(3-5), 134–160. <https://doi.org/10.1159/000157243>
- Rylands, A. B., Groves, C. P., Mittermeier, R. A., Cortés-Ortiz, L., & Hines, J. J. (2006). Taxonomy and distributions of Mesoamerican primates. In *New Perspectives in the study of Mesoamerican primates distribution, ecology, behavior, and conservation*. essay, Springer. Boston, MA. USA. 29-79.
- Rylands, A. B., & Mittermeier, R. A. (2008). The diversity of the New World Primates (Platyrrhini): An annotated taxonomy. *South American Primates*, 23–54. https://doi.org/10.1007/978-0-387-78705-3_2

- Tajima, F. (1989). Statistical method for testing the neutral mutation hypothesis by DNA polymorphism. *Genetics*, 123(3), 585–595. <https://doi.org/10.1093/genetics/123.3.585>
- Thomas, O. (1902). On some new mammals from Northern Nyasaland. *Proceedings of the Zoological Society of London*, 72(1), 118–121. <https://doi.org/10.1111/j.1469-7998.1902.tb08210.x>
- Zaldivar, M. E., Glander, K. E., Rocha, O., Aguilar, G., Vargas, E., Gutiérrez-Espeleta, G. A., & Sánchez, R. (2003). Genetic variation of mantled howler monkeys (*Alouatta palliata*) from Costa Rica. *BIOTROPICA*, 35(3), 375-381. <https://doi.org/10.1646/02062>



DIVERSIDAD DE MAMÍFEROS EN LA RESERVA NATURAL PRIVADA CERRO CHUCANTÍ, DARIÉN, PANAMÁ

DIVERSITY OF MAMMALS IN THE CERRO CHUCANTÍ PRIVATE NATURE RESERVE, DARIEN, PANAMA

Pedro Méndez-Carvajal

Universidad de Panamá, Facultad de Ciencias Naturales, Exactas y Tecnología, Departamento de Fisiología y Comportamiento Animal, Panamá.

mendez55.pm@gmail.com

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

Ricardo Moreno

Yaguará Panamá S.A., Panamá

rmorenopan@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0002-9645-5135>

Karol M. Gutiérrez-Pineda

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

madelinekarol@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0001-9129-7716>

Fecha de recepción: 16 de mayo de 2023

Fecha de aceptación: 17 de octubre de 2023

DOI <https://doi.org/10.48204/j.tecno.v26n1.a4654>

RESUMEN

El bosque nuboso representa uno de los hábitats menos estudiados en el Neotrópico, siendo difícil de abordar por las condiciones para acceder a la topografía montañosa. El objetivo en este estudio fue realizar un primer listado de la diversidad de mamíferos presentes en la Reserva Natural Privada Cerro Chucantí (RNPCC), evaluando a su vez su actividad circadiana y otros aspectos que puedan ayudar a conocer la ecología del Bosque Nuboso de la RNPCC. Detectamos cinco órdenes, 14 especies de 12 géneros, para mamíferos arbóreos. Dentro del fototrampeo del sotobosque detectamos seis órdenes, 14 géneros, 13 familias y 19 especies. Con redes de niebla identificamos 15 especies de 10 géneros, pertenecientes a la familia Phyllostomidae. En este estudio se logró reconocer por primera vez la diversidad de mamíferos en la RNPCC, misma que muestra una tendencia muy similar a otros bosques nubosos del Neotrópico, con un total de 58 especies.

PALABRAS CLAVES

Arborícola, Bosque nuboso, Chiroptera, Sistema de Cámaras Orión, Primates.

ABSTRACT

The cloud forest represents one of the least studied habitats in the Neotropics, being difficult to approach to access the mountainous topography. The objective in this study was to make a first list of the diversity of mammals present in the Cerro Chucantí Private Nature Reserve (RNPCC), evaluating in turn their circadian activity and other aspects that can help to understand the ecology of the Cloud Forest of the RNPCC. We detected five orders, 14 species from 12 genera, for arboreal mammals. Within the photo trick of the understory, we detected six orders, 14 genera, 13 families and 19 species. With mist nets we identified 15 species from 10 genera, belonging to the Phyllostomidae family. In this study, it was possible to recognize for the first time the diversity of mammals in the RNPCC, which shows a very similar trend to other cloud forests in the Neotropics, with a total of 58 species.

KEY WORDS

Arboreal, Chiroptera, Cloud Forest, Orion Camera System, Primates.

INTRODUCCIÓN

El bosque nuboso representa uno de los hábitats menos estudiados en el Neotrópico, siendo difícil de abordar por las condiciones climáticas y el acceso a la topografía montañosa (Kappelle, 1996; Medina *et al.*, 2012; Ríos-Uzeda, 2001; Sánchez-Porras *et al.*, 2021). Es uno de los tipos de vegetación más representativos del que se carece de estudios sobre sus principales dispersores y polinizadores, los mamíferos (Méndez-Carvajal *et al.*, 2020; Sánchez-Porras *et al.*, 2021). Por ejemplo, hay informes de plantas particulares afectadas por cambios climáticos, incidiendo negativamente en la presencia de otras especies de nivel montano (Mijango-Ramos *et al.*, 2020). Los mamíferos de bosque nuboso son importantes por sus funciones ecológicas, lo que los hace clave para estudiar la ecología y la conservación de los hábitats (Glanz, 1992). Los estudios de vegetación nubosa han encontrado importancia como puntos críticos, paisajes interesantes para comprender los efectos del aislamiento y aspectos para involucrar actividades de conservación. Estudios en Calakmul, México y Costa Rica, refieren a los bosques nubosos como colectores de agua, completando la condensación, precipitación y formando cuerpos de agua con periodos constantes de lluvias (Galindo-Leal *et al.*, 2000; Jiménez *et al.*, 2014; Mijango-Ramos *et al.*, 2020). Aun siendo considerados de importancia para las variables microclimáticas (ej. bosque de la Cordillera Centroamericana), la presión antrópica sobre estas áreas es cada vez mayor,

poniendo en riesgo la conectividad de bosques y la comunicación poblacional de los mamíferos medianos que utilizan los corredores biológicos de montaña (Dettman, 2006). Los estudios relacionados con el bosque nuboso se han dirigido a iniciativas de conservación especialmente en biodiversidad o para grupos especiales de mamíferos, como es el caso de Honduras, reportando 37 especies de mamíferos de tamaño mediano, enfocándose en la dinámica poblacional, relación depredador-presa, felinos como indicadores de depredadores (Portillo-Reyes & Elvir, 2013), objetivos similares se tomaron en Panamá, con el Parque Nacional Cerro Hoya, tomando grandes felinos como *Panthera onca* como indicadores de hábitat bien conservado (Fort *et al.*, 2014). Otros trabajos comparan censos consecutivos de mamíferos para monitorear o confirmar la presencia/ausencia de especies de mamíferos, establecer una lista de diversidad y probar diferentes métodos que podrían ayudar a otros científicos a evaluar mejor un área montañosa, tal es el caso de Costa Rica complementando con actividad circadiana, fenología y actualizando listas de especies a nivel estacional para evaluar la dinámica poblacional de sus mamíferos en la Reserva Biológica Alberto Manuel Brenes (Sánchez-Porras *et al.*, 2021). En Bolivia, por ejemplo, se reportaron 14 a 16 especies de mamíferos en dos estudios sistemáticos con cámara trampa, logrando a largo plazo una evaluación de la mastofauna del “Camino de la Muerte en Cotapata, La Paz, Bolivia, siendo este uno de los registros de mayor altura sobre biodiversidad (Ayala *et al.*, 2022; Ríos-Uzeda, 2001). Se mencionan otros grupos de importancia, en México, por ejemplo, los hábitats de bosque nuboso han reportado alrededor de 1,700 especies de aves (Navarro-Zigüenza *et al.*, 2014), ejemplos similares son para Panamá, con 250 especies de aves reportadas como una lista preliminar de aves en el Parque Nacional Cerro Hoya (Miller *et al.*, 2015). Los servicios ecosistémicos son otro objetivo, ya que los bosques de montaña siempre están relacionados con buenos suelos para la agricultura, además de las características climáticas templadas, hacen aportes interesantes para los cafetales de sombra, frutas y flores, o diversidad de información que podría ser útil como indicadores y para enriquecer los agroecosistemas y su conservación (Loría & Méndez-Carvajal, 2017; Sánchez-Brenes & Moya-Calderón, 2018). En Panamá, el volcán Barú obtuvo una buena diversidad de mamíferos que se relaciona con el potencial de dispersores y polinizadores, especies clave para la conservación (Sánchez, 2015). Estudiar la biodiversidad en las tierras altas es más urgente en la actualidad, siendo eventualmente la única cubierta forestal que permanecerá como consecuencia del uso intensivo de las tierras bajas. Este proceso antrópico está obligando a las especies de tierras bajas a adaptarse al bosque premontano, montano o bosque nuboso. Esto puede crear posibles cambios en la diversidad y la dinámica de la población en las tierras altas para las comunidades de mamíferos, pero puede desempeñar un papel importante como banco de semillas para

plantas endémicas que pueden perderse en las tierras bajas. Las especies de mamíferos podrían servir como potenciales dispersores, donantes para una futura regeneración forestal, por lo que los estudios de diversidad de especies en las tierras altas son de beneficio para la conservación (Méndez-Carvajal *et al.*, 2020). En Panamá, hemos realizado estudios para identificar especies clave como potenciales regeneradores de la vegetación nativa (por ejemplo, monos aulladores y murciélagos) en la Reserva Forestal El Montuoso (RFEM) (Méndez-Carvajal *et al.*, 2004; 2020). Estudios recientes en la RFEM han identificado al menos 44 especies de mamíferos, pero la composición de órdenes de mamíferos por montaña complementado con el estudio de sus aves nos podrá dar un enfoque más realista del potencial regenerador, y donador de esta biodiversidad (Méndez-Carvajal *et al.*, 2020). El objetivo en este estudio fue realizar un primer listado de la diversidad de mamíferos presentes en el bosque nuboso de la Reserva Natural Privada Cerro Chucantí (RNPCC), evaluando a su vez su actividad circadiana y otros aspectos que puedan ayudar a conocer la ecología su bosque nuboso.

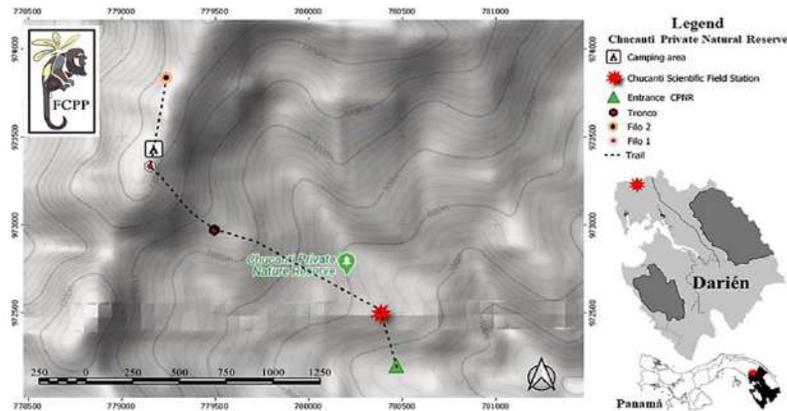
MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

La Reserva Natural Privada Cerro Chucantí (RNPCC) está ubicada en el corregimiento de Agua Fría, distrito de Chepigana, en la provincia de Darién, República de Panamá, con coordenadas 08°47'16.5" N, 078°27'01.4" W, está en la mayor elevación de la Cordillera del Majé con 1,450 msnm (Laurance, 2008). Las temperaturas anuales oscilan entre 24-27 °C, precipitación anual de 1,940.5 mm/año (Gutiérrez-Pineda *et al.*, 2021). El hábitat es bosque montano y submontano con características de bosque nuboso con muchas epífitas y briófitas (Méndez-Carvajal, 2012). La RNPCC cuenta con 1,200 especies de árboles, incluidas 128 especies con 99 especies de plantas vasculares, donde las familias más abundantes son Rosaceae, Magnoliaceae, Gentianaceae y Fabaceae (Flores *et al.*, 2017; Mijango-Ramos *et al.*, 2020; Ortiz *et al.*, 2016). La población humana que rodea esta reserva procede en su mayoría de la península de Azuero, una región muy conocida en Panamá por la práctica de actividad agrícola y ganadera. La RNPCC ha sido objeto de varios estudios que reconocen el endemismo de plantas, anfibios, ectoparásitos, mamíferos y aves (Batista *et al.*, 2020; Bermúdez *et al.*, 2012; Bezark *et al.*, 2013; Haelewaters, 2019; Méndez-Carvajal, 2012; Méndez-Carvajal 2014; Méndez-Carvajal 2015) (Figura 1).

Figura 1.

Ubicación de la zona de muestreo dentro de la Reserva Natural Privada Cerro Chucantí, Aguas Frías, Chepigana, Darién, República de Panamá.



Colecta de datos para mamíferos terrestres

Llevamos a cabo un sistema de monitoreo a largo plazo utilizando tres cámaras trampa a nivel del suelo del bosque desde diciembre de 2012 a mayo de 2014, y cinco cámaras trampa a nivel del dosel del bosque utilizando el Sistema de Cámaras Orión (SCO), desde el 4 de marzo de 2013 a septiembre de 2014 (Méndez-Carvajal, 2014). Usamos una cámara Cuddeback y siete Bushnell Trophy Cam colocadas a lo largo de los primeros tres kilómetros del sendero del lado izquierdo. Las cámaras se ubicaron de la siguiente manera: estación SCO 1 “Sendero Talauma” (743 msnm; N 08°47'22.7" W 78°27'3.9"; 12 m), OCS 2 (N 08°47'27.5" W 78°27'18.1"; 14 m), sotobosque estación 1 “tronco (800 msnm; N 08°47'36.69" W 78°27'33.71"), OCS 3 (N 08°47'24.3" W 78°27'2.8"; 12 m), sotobosque estación 2 “filo 1 y OCS 4 (1,350 msnm; N 08°47'48.46" W 78°27'45.08"), y estación de sotobosque 3 “filo 2 y OCS 5” (1,375 msnm; N 08°48'05.01" W 78°27'42.038. 61"), OCS 5 (N 08°47'07.5" W 78°27'7.6"). Las cámaras se separaron con distancias de 1 km a lo largo de un sendero de 3 km que pasa por el filo de Cerro Chucantí. Observaciones complementarias se hicieron *Ad-libitum* por caminatas y utilizando Senderos de Franja con observación directa, o bien, detectando presencia por vocalizaciones, rastros de huellas del 29 de mayo de 2008 al presente. Para los mamíferos voladores se utilizaron redes de niebla en las siguientes localidades red 1 (803 msnm; N 08°47'21.1 " W 78°27'11.3"), red 2 (918 msnm; N 08°47'31.1" W 78°27'23.5"), red 3 (1,047 msnm; N 08°47'26.6" W 78°27'3.4"), red 4 (1,049 msnm; N 08°47'28.8" W 78°27'1.5"), fueron de 1 a 3 redes de muestreo con 6 a 12 m de largo y 1.5 de ancho, 4 bolsas, de 18:00 a 00:00 hrs, para dos o tres noches por visita, con un

total, de 23 horas de esfuerzo entre julio de 2012, enero de 2013, diciembre de 2017, 2018, 2019 y 2021, utilizamos la clave de Handley (1981) para identificar a los murciélagos (1981) y la guía de Reid (1987) (2 (Tabla 1).

Tabla 1.

Especies de mamíferos identificados en la Reserva Natural Privada Cerro Chucantí, Agua Fría, Chepigana, Darién, República de Panamá.

Orden	Familia	Especie	Métodos	Cat.	
				UICN	
1	Didelphimorphia	Didelphidae	<i>Didelphis marsupialis</i>	CS, SCO	LC
2	Didelphimorphia	Didelphidae	<i>Caluromys derbianus</i>	SCO	LC
3	Didelphimorphia	Didelphidae	<i>Metachirus nudicaudatus</i>	SCO	LC
4	Pilosa	Myrmecophagidae	<i>Tamandua mexicana</i>	SCO	LC
5	Pilosa	Megalonychidae	<i>Choloepus hoffmanni</i>	SCO	LC
6	Cingulata	Dasyproctidae	<i>Dasyproctus novemcinctus</i>	CS	LC
7	Primates	Callitrichidae	<i>Saguinus geoffroyi</i>	T	NT
8	Primates	Cebidae	<i>Cebus capucinus</i>	SCO, T	VU
9	Primates	Ateílidae	<i>Alouatta palliata aequat orialis</i>	SCO, T	VU
10	Primates	Ateílidae	<i>Ateles fusciceps rufiventris</i>	SCO, T	VU
11	Primates	Ateílidae	<i>Ateles geoffroyi griseus</i>	T	DD
12	Rodentia	Sciuridae	<i>Sciurus granatensis</i>	CS, SCO	LC
13	Rodentia	Cricetidae	<i>Tylomys panamensis</i>	SCO	DD
14	Rodentia	Cricetidae	<i>Melanomys caliginosus</i>	OE	LC
15	Rodentia	Echimyidae	<i>Proechimys semispinosus</i>	CS	LC
16	Rodentia	Erethizontidae	<i>Coendou quichua</i>	SCO	DD
17	Rodentia	Dasyproctidae	<i>Dasyprocta punctata</i>	CS, T	LC
18	Rodentia	Cuniculidae	<i>Cuniculus para</i>	CS	LC
19	Lagomorpha	Leporidae	<i>Sylvilagus gabbi</i>	CS	LC
20	Carnivora	Canidae	<i>Urocyon cinereoargenteus</i>	CS	LC
21	Carnivora	Procyonidae	<i>Nasua narica</i>	CS	LC
22	Carnivora	Procyonidae	<i>Potos flavus</i>	CS, SCO, H	LC
23	Carnivora	Mustelidae	<i>Eira barbara</i>	CS	LC
24	Carnivora	Felidae	<i>Panthera onca</i>	OGP,	NT
25	Carnivora	Felidae	<i>Herpailurus yagouaroundi</i>	CS	LC
26	Carnivora	Felidae	<i>Puma concolor</i>	CS, H	LC
27	Carnivora	Felidae	<i>Leopardus tigrinus onxilla</i>	CS	VU
28	Carnivora	Felidae	<i>Leopardus wiedii</i>	CS	NT
29	Carnivora	Felidae	<i>Leopardus pardalis</i>	CS, H	LC
30	Cetartiodactyla	Tayassuidae	<i>Pecari tajacu</i>	CS	LC
31	Cetartiodactyla	Cervidae	<i>Mazama temama</i>	H, OGP	DD
32	Cetartiodactyla	Cervidae	<i>Odocoileus virginianus</i>	H, OGP	LC
33	Chiroptera	Emballonuridae	<i>Saccopteryx leptura</i>	RN	LC
34	Chiroptera	Phyllostomidae	<i>Desmodus rotundus</i>	RN	LC
35	Chiroptera	Phyllostomidae	<i>Micronycteris microtis</i>	RN	LC
36	Chiroptera	Phyllostomidae	<i>Carollia perspicillata</i>	RN	LC
37	Chiroptera	Phyllostomidae	<i>Carollia castanea</i>	RN	LC
38	Chiroptera	Phyllostomidae	<i>Carollia brevicauda</i>	RN	LC
39	Chiroptera	Phyllostomidae	<i>Lophotoma silvicolum</i>	RN	LC
40	Chiroptera	Phyllostomidae	<i>Vampyressa thuyne</i>	RN	LC
41	Chiroptera	Phyllostomidae	<i>Artibeus lituratus</i>	RN	LC
42	Chiroptera	Phyllostomidae	<i>Artibeus jamaicensis</i>	RN	LC
43	Chiroptera	Phyllostomidae	<i>Artibeus intermedius</i>	RN	LC
44	Chiroptera	Phyllostomidae	<i>Vampyroides caraccioli</i>	RN	LC
45	Chiroptera	Phyllostomidae	<i>Chiroderma salvini</i>	RN	LC
46	Chiroptera	Phyllostomidae	<i>Uroderma billobatum</i>	RN	LC
47	Chiroptera	Phyllostomidae	<i>Centurio senex</i>	RN	LC
48	Chiroptera	Phyllostomidae	<i>Platyrrhinus dorsalis</i>	OE	LC
49	Chiroptera	Phyllostomidae	<i>Enchisthenes hartii</i>	OE	LC
50	Chiroptera	Phyllostomidae	<i>Glossophaga commissaris</i>	OE	LC
51	Chiroptera	Phyllostomidae	<i>Lichonycteris obscura</i>	OE	LC
52	Chiroptera	Phyllostomidae	<i>Micronycteris microtis</i>	OE	LC
53	Chiroptera	Phyllostomidae	<i>Micronycteris schmidtorum</i>	OE	LC
54	Chiroptera	Phyllostomidae	<i>Stenira hisi</i>	OE	LC
55	Chiroptera	Phyllostomidae	<i>Trachops cirrhosus</i>	OE, RN	LC
56	Chiroptera	Mormopidae	<i>Pteronotus gymnotus</i>	OE	LC
57	Chiroptera	Mormopidae	<i>Pteronotus parnellii</i>	OE, RN	LC
58	Chiroptera	Vespertilionidae	<i>Myotis riparius</i>	OE	LC

*Leyenda: Cámaras sotobosque (CS), Sistema de Cámaras Orión (SCO), Red de niebla (RN), Transecto (T), Huellas (H), Observación por Guardaparques (OGP), Otros estudios (OE).

Análisis de los datos

Se utilizó el software PAleontological STatists (PAST 4.02), calculando la gráfica de detección del número de especies por mes y su porcentaje de frecuencia. También se realizaron gráficos de actividad circadiana considerando especies que tuvieran más de 11 eventos fotográficos, con intervalos de más de 30 minutos por fotografía si era de la misma especie (Mosquera-Muñoz, 2014). Calculamos índices de diversidad beta, diferencias entre sitios utilizando Whittaker (Whittaker 1960). Usamos cuatro estimadores de riqueza de especies no paramétricos Chao 1 y 2 para determinar el éxito del muestreo por sitio, Chao 2 Jackknife de primer y segundo orden y Bootstrap (Heltsh & Forrester 1983, Chao 1987). Todos estos requieren datos de presencia-ausencia en dos o más cuadrantes muestreados de igual tamaño (Burnham y Overton. 1978, 1979, Smith y van Belle 1984). Para densidades, el análisis de datos se basó en Chao 2 para el índice de detectabilidad general.

Índices de diversidad

Las estadísticas fueron aplicadas a los datos de asociación, donde el número de individuos se colocan en filas (taxones) y columnas (muestras). Siendo las siguientes, para cada muestra: Número de taxas (S), Número total de individuos (n), Dominancia $D = 1 - \text{Índice de Simpson}$ (varía de 0 entendiéndose que todos los taxones están igualmente presentes, a 1 cuando un taxón domina completamente la comunidad). El índice de Simpson 1-D, mide la 'equidad' de la comunidad de 0 a 1. El Índice de Shannon H (entropía), un índice de diversidad que toma en cuenta el número de taxones y de individuos, varía de 0 para comunidades con un solo taxón a valores altos para comunidades con muchos taxones, cada uno con pocos individuos. El Índice de riqueza de Margalef: $(S-1) / \ln(n)$, Alfa de Fisher, un índice de diversidad, definido implícitamente por la fórmula $S = a * \ln(1 + n/a)$ donde S es el número de taxones, n es el número de individuos y a es el alfa de Fisher. Chao1, es un sesgo corregido: una estimación de la riqueza total de especies basada en el número de especies "singleton" y "doubleton" (Harper, 1999). Se utilizó "Beta Diversities" para determinar la diversidad beta entre los sitios y "Whittaker", para la diversidad global, esto para determinar la diferencia de especies entre los sitios de cámara trampa (Whittaker, 1960).

RESULTADOS

Diversidad de mamíferos en dosel

Detectamos cinco órdenes, 13 especies de 12 géneros, para mamíferos arbóreos. Usando cámaras trampa en el dosel por SCO, encontramos, según el Índice de Simpson, una alta diversidad con baja dominancia, pero baja abundancia y riqueza. Con Chao 1

el número de especies detectadas con este método fue el valor mínimo (13), hasta un máximo de 19 especies que se pudieron detectar (Tablas 1 y 2).

Tabla 2.

Índice de diversidad ecológica para la detección en dosel, sotobosque y red de niebla de la Reserva Natural Privada Cerro Chucantí, Agua Fría, Chepigana, provincia de Darién, República de Panamá.

Índices	Dosel	Sotobosque	Redes
S	13	19	14
n	122	313	51
D	0.1414	0.12	0.2049
1-D	0.8586	0.88	0.7951
H'	2.172	2.38	2.008
Margaleff	2.498	3.13	3.306
Fisher's alpha	3.683	4.45	6.369
Chao1	16 min: 13 , max:19	19 min: 19 , max:29	18.2 min: 10 , max 31

Diversidad de mamíferos en sotobosques

Dentro del foto trampeó del sotobosque detectamos seis órdenes, 14 géneros, 13 familias y 19 especies. Los índices de diversidad alfa muestran alta diversidad con baja dominancia, baja abundancia y riqueza media. El Chao 1 muestra que el número ideal de especies detectadas es el logrado (19), pero sugiere se podrían detectar un máximo de 29 especies terrestres. Logramos un patrón de actividad circadiana para nueve especies del sotobosque, cuatro de Carnivora, tres de Rodentia, una de Didelphimorphia y una de Cingulata (Tablas 1 y 2; Figuras 2 y 3).

Figura 2.

Mamíferos de dosel detectados por Sistema de Cámaras Orión en la Reserva Natural Privada Cerro Chucantí, Darién, Panamá; A. Alouatta palliata aequatorialis, B. Cebus capucinus, C. Coendou quichua D. Eira barbara, E. Choloepus hoffmanni F. Tylomys panamensis G. Caluromys derbianus, H. Potus flavus, I. Tamandua mexicana.

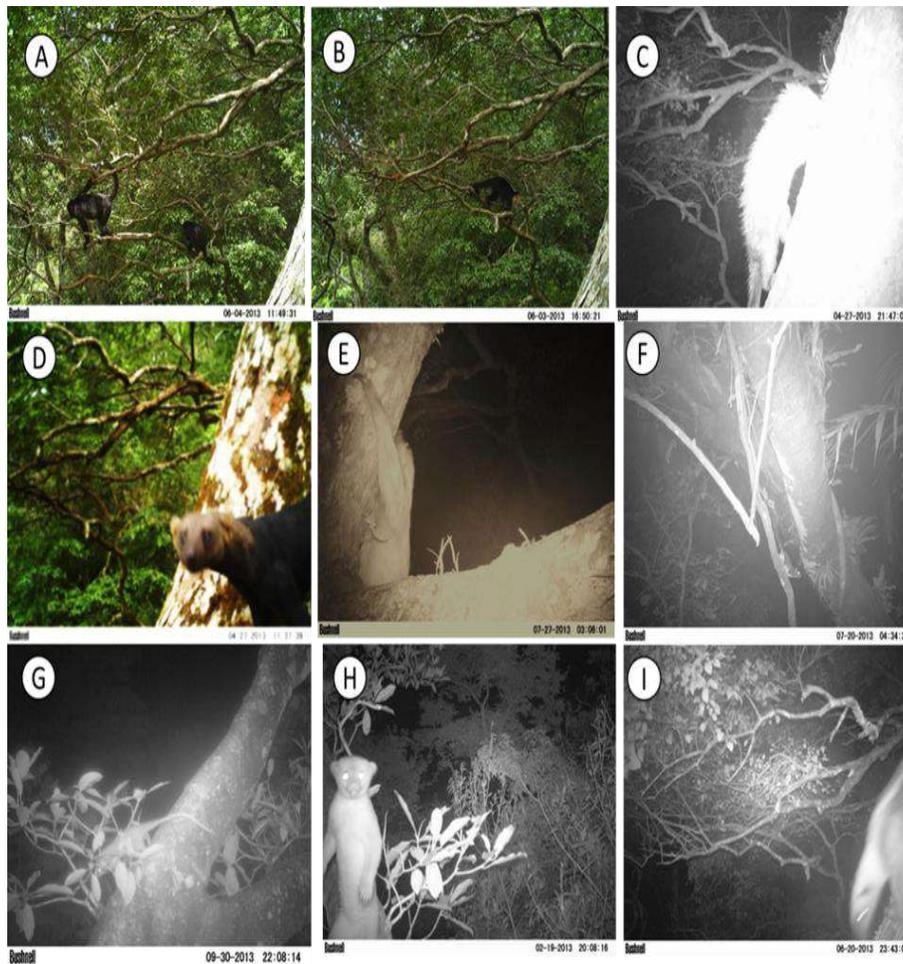
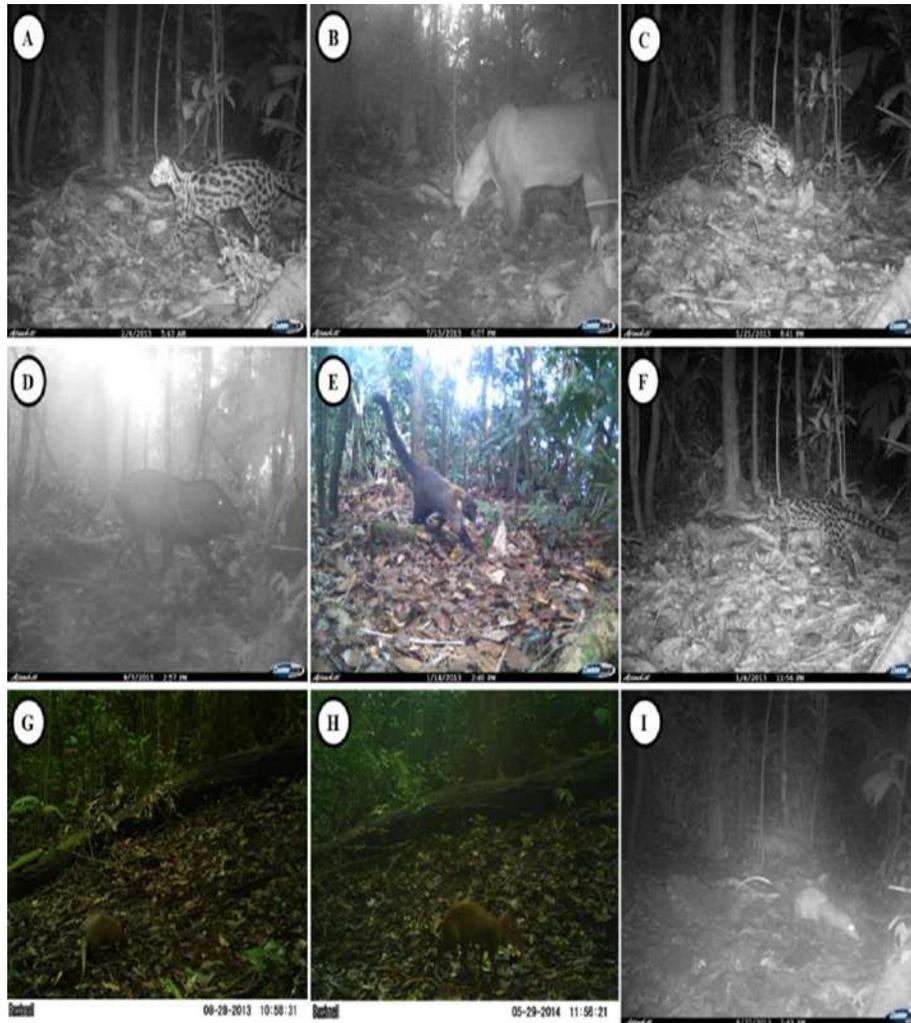


Figura 3.

Mamíferos de sotobosque detectados por fototrampeo en la Reserva Natural Privada Cerro Chucantí, Darién, Panamá; A. Leopardus wiedii, B. Puma concolor, C. Leopardus pardalis D. Pecari tajacu, E. Nasua narica F. Leopardus tigrinus G. Dasypus novemcinctus, H. Dasyprocta punctata, I. Didelphis marsupialis.



Diversidad de mamíferos voladores

Con redes de niebla identificamos 15 especies de 10 géneros, pertenecientes a la familia Phyllostomidae del orden Chiroptera. La diversidad fue alta, pero con dominancia baja, abundancia baja y riqueza media. Según Chao 1, el número de especies detectadas estaba dentro del rango, con posibilidades de detectar un máximo de 31 especies (Tablas 1 y 2).

Figura 4.

Algunos de los mamíferos voladores capturados en redes de niebla en la Reserva Natural Privada Cerro Chucantí, Darién, Panamá; A. Vampyroides caraccioli, B. Carollia perspicillata, C. Artibeus jamaicensis D. Trachops cirrhosus, E. Centurio senex.

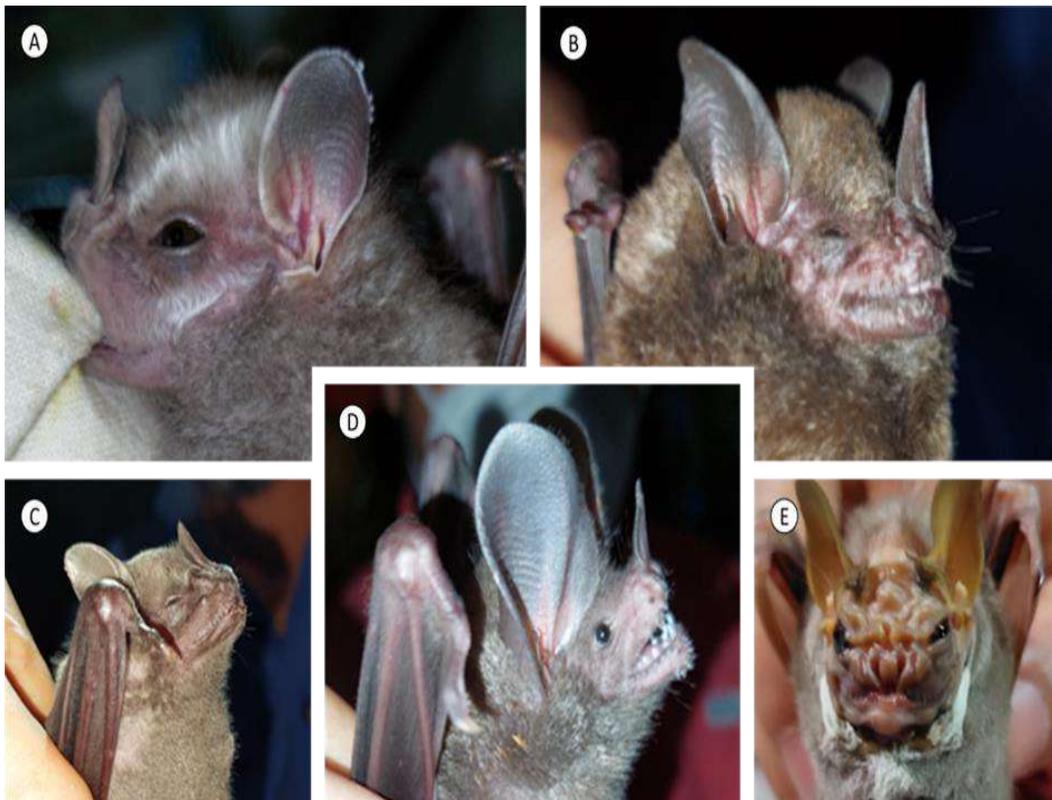
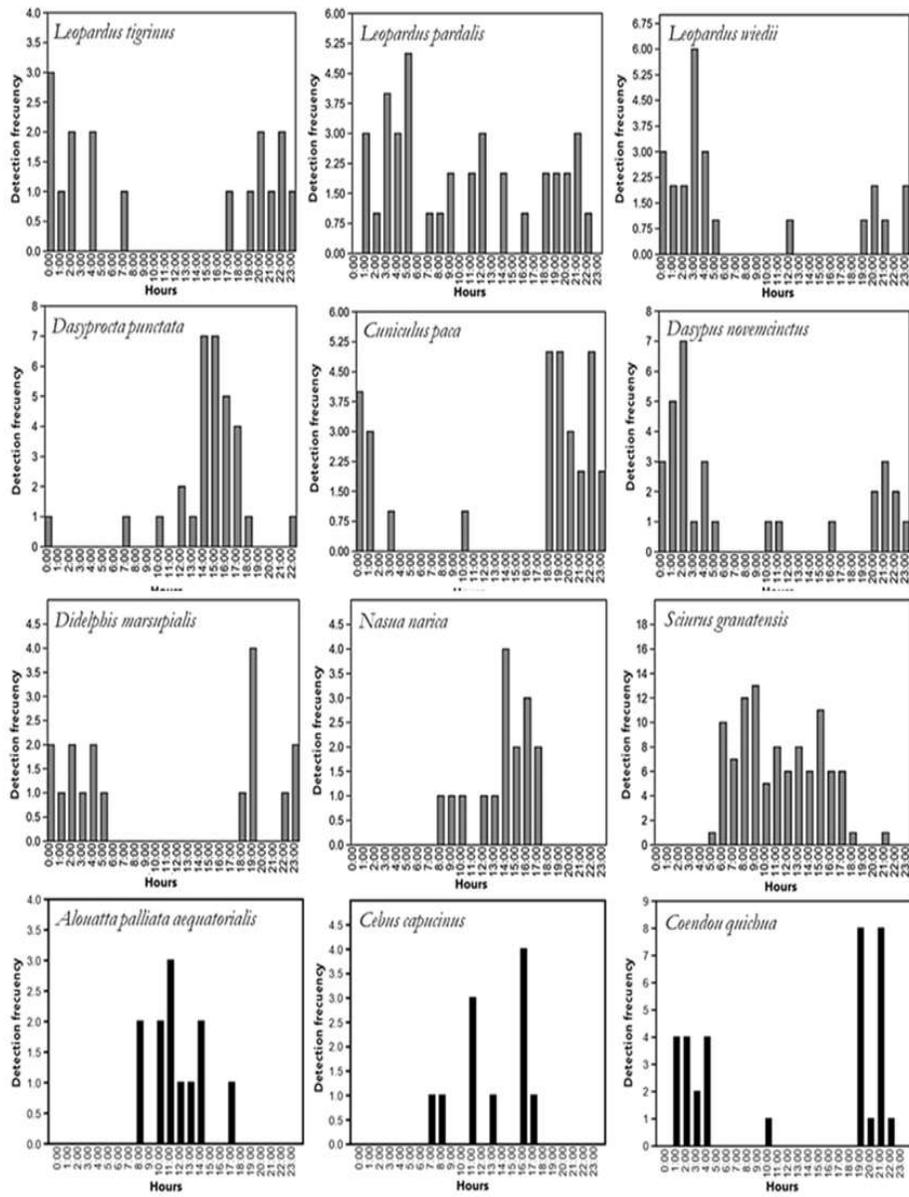


Figura 5.

Actividad circadiana temporal para algunos mamíferos detectados por fototrampeo en dosel y sotobosque en la Reserva Natural Privada Cerro Chucantí, Agua Fría, Chepigana, Darién, República de Panamá.



DISCUSIÓN

En este estudio se logró reconocer por primera vez la diversidad de mamíferos en la RNPCC, misma que muestra una tendencia muy similar a otros bosques nubosos del Neotrópico, con un total de 58 especies, tomando en cuenta que este trabajo incluye un muestreo más amplio en cuanto a mamíferos arborícolas, terrestres y voladores, en comparación con muestreos en el valle de Kcosñipata de Cusco Perú, que reportan entre 32 a 62 especies para alturas entre los 1,250 a 3,600 m (Medina *et al.*, 2012). Supera los reportes de Huánuco, Perú obteniendo este lugar unas 37 especies, aunque en este caso el lugar destaca en reportes nuevos y endemismo a alturas entre 1,620 a 2,043 m (Aquino *et al.*, 2022). Otros estudios también en zonas de Mesoamérica se mantienen con diversidad menor a la encontrada, como lo son el bosque montano de la Reserva Biológica Alberto Manuel Brenes en Alajuela, Costa Rica, con 21 especies reportadas a una altura de 1,035 m (Sánchez-Porras *et al.*, 2021), en tanto que la Reserva Forestal El Montuoso en Herrera, Panamá, reporta 44 especies de mamíferos (Méndez-Carvajal *et al.*, 2020). Debido a las diferentes técnicas y sistemática de cada lugar muestreado por país, no es posible hacer comparaciones por esfuerzo de muestreo, pero se observa que el factor de captura de murciélagos es importante para reconocer contribuyentes de dispersión y conexión por diversidad trófica que ayude a diagnosticar en el futuro el manejo de la RNPCC y efectos con su paisaje agroforestal circundante, como bien sugiere Park (2015). Este es el primer listado de mamíferos levantado para Chucantí, con un muestreo intermitente de 14 años, los resultados confirman que Chucantí es una zona muy importante, albergando un 34% de la diversidad de mamíferos reportada en el país, y el 22% del total de murciélagos reportados para Panamá de acuerdo con el total estipulado por Samudio (2002).

La mayoría de las especies mostraron actividad catemeral utilizando horas intermedias diurnas y nocturnas, excepto *Nasua narica*, *Sciurus granatensis*, y primates, detectadas en cámaras únicamente durante el día, y *Didelphis marsupialis*, y *Coenduou quichua* estrictamente detectadas activas durante la noche (Fig. 5). Otros estudios que resaltan variación en la actividad circadiana señalan que esta actividad podría variar por estacionalidad climática, y pueden mostrar a otras especies cambiando su actividad dependiendo de la presencia de depredadores y fuentes de agua (Sánchez-Porras *et al.*, 2021), algo que aplicaría a la RNPCC debido a que presenta cambios marcados en la cantidad de agua de sus riachuelos dependiendo de la estación seca o lluviosa. Algunas especies tienen mayor incidencia en los senderos del lado izquierdo de la RNPCC, tomando en cuenta quizá la estructura del bosque y las fuentes de agua existe también mayor frecuencia de uso del filo del cerro por especies como *Puma concolor*, *Pecari*

tajacu y *Nasua narica* por lo que es frecuente encontrar tierra removida por forrajeo y excretas de puma a lo largo del sendero. La cantidad de felinos es completa a diferencia de otras zonas en Panamá como Parque Nacional Cerro Hoya o Reserva Forestal El Montuoso (Fort *et al.*, 2014; Méndez-Carvajal *et al.*, 2020), siendo este trabajo la única región de Panamá al momento que confirma la presencia del felino más pequeño del Neotrópico, *Leopardus tigrinus oncilla*, solo reportado para la zona este de Panamá (Rodgers & Kapheim, 2017; Payan y Oliveira, 2016). De igual forma se reporta la presencia del mayor felino de la región, *Panthera onca*, dándole estas dos especies, un valor agregado a la necesidad de protección y estudio en esta reserva biológica. Es importante resaltar que estos carnívoros poseen una amplia gama de recurso alimenticio, no solo con los mamíferos más pequeños sino también con al menos nueve aves caminadoras tales como *Crax rubra*, *Penelope purpurascens* y palomas como *Zentrygon goldmani*, entre otras (Gutiérrez-Pineda *et al.*, 2021). Otro grupo de importancia fue el de los primates, con cinco especies confirmadas (Méndez-Carvajal, 2012), sobre todo el mono araña negro del Darién *Ateles fusciceps rufiventris*, clasificada dentro de los 25 primates en mayor peligro del mundo según Tirira *et al.*, (2022). Los monos *A.f.rufiventris* se han observado en al menos ocho subgrupos, cada uno con unos cuatro individuos como mínimo, y pueden llegar a separarse entre subgrupos de 500 a 1,000 metros, por lo que son potencial indicador de conectividad del bosque, aplicando la teoría de “paisajes sostenibles”, en donde meta-poblaciones de primates pueden repoblar fragmentos a largo plazo si se mantiene el potencial de migración de especies clave (*Alouatta* y *Ateles* en nuestro caso), actividades sostenibles y vigilancia de pobladores locales, de acuerdo a estudios realizados con *Leontopithecus chrysopygus* en Sao Paulo, Brazil (Chazdon *et al.*, 2020; Mandujano *et al.*, 2006). El mono araña gris del Darién *A. g. grisescens* ha sido una de las más buscadas subespecies en la última década por FCPP, su paradero se perdió desde hace 70 años (Méndez-Carvajal, 2021). El localizar dos subgrupos de hembras con infantes y un macho solitario, siendo una especie de primate con categoría DD, remarca la importancia de la RNPCC (Méndez-Carvajal *et al.*, 2022). Los primates presentes son agentes de alta dispersión de semillas, polinizadores, y proveedores de frutos para animales que no pueden subir al dosel, por lo que representan un agente regenerador, y proveedor que marca eventualmente los patrones de movimiento de presas y depredadores del sotobosque (Méndez-Carvajal *et al.*, 2020). Otro encuentro importante ha sido la presencia de la rata escaladora panameña *Tylomys panamensis*, reportada en la RNPCC después de 64 años de su última aparición en literatura científica (Méndez-Carvajal, 2015). Aparte de la diversidad de especies medianas escansorias, los mamíferos voladores encontrados en la reserva son representados por especies típicas de bosque montano según un trabajo de comparación de diversidad de murciélagos en todo Centro y Suramérica por Medina-Fitoria *et al.* (2010), con variedad en categorías

tróficas, lo que implica una alta diversidad de controladores de insectos, anfibios, dispersores de frutas y polinizadores de flores, por parte de la familia Phyllostomidae, incluyendo especies indicadoras como *Carollia castanea*, *Centurio senex*, *Trachops cirrhosus*. Para el caso de *Centurio senex* aunque la información es limitada, se sabe que es un murciélago de mordida potente, y puede jugar un papel importante en la dispersión de especies de plantas que tienen frutos carnosos grandes o muy fuertes, sobre todo de géneros como *Ficus*, *Spondias*, o bien *Sideroxylon* de acuerdo a Villalobos-Chaves *et al.* (2016). Sin embargo, con base a los estudios botánicos realizados en la RNPCC, podemos observar que a pesar de que la relación de abundancia relativa de árboles se acostumbra a relacionarla con aves, lo cierto es que sus especies más dominantes están relacionadas también con primates; *Dendropanax arboreus* el más abundante para Chucantí (Mijango-Ramos *et al.*, 2020), ha sido reportado como dieta de *Ateles* (Estrada & Coates-Estrada, 1985). Algunas veces se puede dar una relación de ayuda entre una especie de primate y otra, donde uno remueve la coraza, defeca la semilla y otro busca la excreta y separa el material para aprovecharlo, por ejemplo, van Roosmalen *et al.* (1988), citan una dependencia entre *Chiropotes satanas* con *Cebus* y *Ateles* en al menos 34 especies de árboles en Surinam, lo que indica la importancia de proteger a todas las especies en un hábitat. En el caso de *Calypthranthes* sp., un género de plantas fanerógamas encontrado dominante en la RNPCC, también se reporta como parte de la dieta de *A.f.fusciceps* en el Chocó Ecuatoriano según estudios por Morelos-Juárez *et al.* (2015). Los estadísticos en este estudio denotaron que si bien es cierto hay una diversidad buena para cada método, en general se ha logrado una buena representación de lo que existe en la reserva utilizando estos métodos, con la posibilidad de doblar la cantidad de especies detectables en el sotobosque y muestreo con redes.

CONCLUSIONES

Este estudio debe ser considerado como un primer esfuerzo de inventario de diversidad de mamíferos para la RNPCC, y se espera continuar con más monitoreos a largo plazo, utilizando siempre las mismas técnicas para lograr hacerlo más comparable. Podemos reconocer que el uso de cámaras en el estrato medio del bosque utilizando el Sistema de Cámaras Orión (SCO) fue determinante con el 20% de las especies detectadas, así también lo fue el uso de redes de niebla aportando un 47% del listado final de las especies, lo que indica que los trabajos de biodiversidad de mamíferos que no presenten estos métodos podrían tener grandes sesgos. Aun así, este trabajo puede mejorar con la inclusión de trampeo para roedores pequeños, que solamente se ha realizado en la reserva con un proyecto de ectoparásitos en mamíferos domésticos y silvestres, pero

obteniendo pobre captura (Bermúdez *et al.*, 2012). Dos especies poco detectadas fueron el venado colablanca *Odocoileus virginianus* y el venado corzo *Mazama temama*, este último considerado por algunos autores como especie indicadora de ecosistema saludable para bosques conservados (Sánchez-Porras *et al.*, 2021). La poca detección de *M. temama* y *O. virginianus* aunado a una eventual aparición de perros de cacería en las cámaras nos podría alertar de una incidencia de cacería puntual a estas especies, sugiriendo a la reserva reforzar la vigilancia con más guardaparques. Un impacto antrópico notable es la familiaridad de los monos títies *Saguinus geoffroyi* a los visitantes, cambiando su comportamiento natural al aproximarse 1 m cerca a las personas de la estación científica, esto se puede mejorar evitando el almacenamiento de frutos o bien plataformas de comederos para aves, ya que podría ser foco infeccioso y de habituación. Actividades de alimentación y uso de animales domésticos cercanos al sendero principal de la RNPCC podrían permitir intercambios parasitarios comprometiendo la salud de los mamíferos del área según lo encontrado por Bermúdez *et al.* (2012). Parte de las amenazas de una reserva es su fácil accesibilidad, por lo que la RNPCC asegurará mayor protección a su flora y fauna siempre que evite el corte para carretera de acceso, mitigando la contaminación auditiva, y de gases tóxicos según lo encontrado por Ayala *et al.* (2022).

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a la Fundación Pro-Conservación de los Primates Panameños (FCPP), Grupo de Investigación de Primatología de la Universidad de Panamá (GIP-UP), ADOPTA Bosque Panamá por apoyar este estudio a nivel logístico. Este estudio a largo plazo fue financiado por Idea Wild, Mohamed bin-Zayed Species Conservation Fund (proyecto # 1025476 y 12055182); II Rufford Small Grant for Nature Conservation (proyecto #16021) y Re:wild (2023). Nuestro agradecimiento a los estudiantes de los diferentes cursos de primatología realizados por FCPP-GIP-UP (2009 hasta el presente), quienes mantienen el muestreo año tras año en la reserva. A los guardaparques de la reserva Juan Camaño, Arcelio Castillo. Este estudio se llevó a cabo con permiso científico del Ministerio de Ambiente de Panamá No. SE/A-53-18 y ARB-0028-2021.

REFERENCIAS

Aquino, R., Pezo, E., & Arévalo, I. (2022). Diversidad y amenazas de los mamíferos mayores en los bosques montanos de Huánuco, Perú. *Revista Peruana de Biología*, 29(3).

- Ayala, G. M., Viscarra, M. E., Ticona, H., & Wallace, R. B. (2022). El “Camino de la muerte” o de la vida silvestre: Relevamientos de fauna en el Parque Nacional y ANMI Cotapata (La Paz, Bolivia). *Ecología en Bolivia*, 57(1), 19-28.
- Batista, A., Mebert, K., Miranda, M., Garcés, O., Fuentes, R., & Ponce, M. (2020). Endemism on a threatened sky island: new and rare species of herpetofauna from Cerro Chucantí, Eastern Panama. *Amphibian & Reptile Conservation*, 14(2), 27-46.
- Bermúdez, S., Miranda, R., Zaldívar, Y., González, P., Berguido, G., Trejos, D., Pascale, J.M., & Labruna, M. (2012). Detection of Rickettsia in ectoparasites of wild and domestic mammals from the Cerro Chucanti private reserve and from neighboring towns, Panamá, 2007-2010. *Biomédica*, 32(2), 189-195.
- Bezark, L. G., Tyson, W.H., & Schiff, N.M. (2013). New species of Cerambycidae from Panama, with new distribution records (Coleoptera: Cerambycidae). *Zootaxa*, 3608 (4), 273-277.
- Burnham, K.P. & Overton, W.S. (1978). Estimation of the size of a closed population when capture probabilities vary among animals. *Biometrika*, 65, 623-633.
- Burnham, K.P. & Overton, W.S. (1979). Robust estimation of population size when capture probabilities vary among animals. *Ecology*, 60, 927-936.
- Chao, A. (1987). Estimating the population size for capture-recapture data with unequal catchability. *Biometrics*, 43, 783-791.
- Chazdon, R. L., Cullen, L., Padua, S.M., & Padua, C.V. (2020). People, primates, and predators in the Pontal: from endangered species conservation to forest and landscape restoration in Brazil's Atlantic Forest. *Royal Society Open Science*, 7(12), 200939.
- Dettman, S. (2006). The Mesoamerican Biological Corridor in Panama and Costa Rica: integrating bioregional planning and local initiatives. *Journal of Sustainable Forestry*, 22(1-2), 15-34.
- Estrada, A., & Coates-Estrada, R. (1985). A preliminary study of resource overlap between howling monkeys (*Alouatta palliata*) and other arboreal mammals in the tropical rain forest of Los Tuxtlas, Mexico. *American Journal of Primatology*, 9(1), 27-37.

- Flores, R., Black, C. & Ibáñez, A. (2017). A new species of *Heliconia* (Heliconiaceae) with pendent inflorescence, from Chucantí Private Nature Reserve, eastern Panama. *PhytoKeys*, (77), 21.
- Fort, J. L., Nielsen, C.K., Donoso, E., Samudio, R., & Duran, G.A. (2014). First camera survey of wild felids in Cerro Hoya National Park, Panama. *Cat News*. 60: 36-37.
- Galindo-Leal, C., Fay, J. P., Weiss, S., & Sandler, B. (2000). Conservation priorities in the greater Calakmul region, Mexico: correcting the consequences of a congenital illness. *Natural Areas Journal*, 20(4), 376-380.
- Gutiérrez-Pineda, K. M., Berguido, G., & Méndez-Carvajal, P.G. (2021). Diversidad ecológica de aves caminadoras en la Reserva Natural Privada Cerro Chucantí, Darién, Panamá. *Mesoamericana*, 25(1).
- Handley Jr, C. O. (1981). Key to the bats of the lowlands of Panama. Washington DC: National Museum of Natural History.
- Harper, D.A.T. (ed.). (1999). Numerical Palaeobiology. John Wiley & Sons.
- Haelewaters, D. (2019). This entry was posted in Biodiversity, Blog, Laboulbeniales, Mycology, Parasites and tagged bat flies, Cerro Chucantí, Laboulbeniales, New World leaf-nosed bats, Panama, PhD thesis, Smithsonian Tropical Research Institute. Book-mark the permalink.
- Heltshe, J. F. & Forrester, N.E. (1983). Estimating species richness using the jackknife procedure, *Biometrics*, 1-11.
- Jiménez, M. A. P., Vargas, L.G.A. , Ugalde, M.C., & Monge, R.Q. (2014). Estructura y composición florística del bosque nuboso de la Isla del Coco, *Tecnología en Marcha*, 27(6), 2.
- Kappelle, M. (1996). Un bosque tropical montano nuboso: el robledal de altura en Costa Rica. *Revista Forestal Centroamericana*, 5(16), 18-23.
- Laurance, W. F. (2008). Adopt a forest. *Biotropica*, 40(1), 3-6.

- Loría, L. I., & Méndez-Carvajal, P.G. (2017). Uso de hábitat y patrón de actividad del mono cariblanco (*Cebus imitator*) en un agroecosistema cafetalero en la provincia de Chiriquí, Panamá. *Tecnociencia*, 19(1): 61-78.
- Mandujano, S., Escobedo-Morales, L.A. Palacios-Silva, R., Arroyo-Rodríguez, V., & Rodríguez-Toledo, E.M. (2006). A metapopulation approach to conserving the howler monkey in a highly fragmented landscape in Los Tuxtlas, Mexico. New perspectives in the study of Mesoamerican primates: Distribution, ecology, behavior, and conservation, 513-538.
- Medina-Fitoria, A., O. Saldaña, T.J. McCarthy & S. Vilchez. (2010). Nuevos reportes y comentarios históricos de murciélagos (Mammalia: Chiroptera) para la fauna de Nicaragua. *Revista Biodiversidad y Áreas Protegidas*, 2: 93-101.
- Medina, C. E., H. Zeballos & E. López. (2012). Diversidad de mamíferos en los bosques montanos del valle de Kcosñipata, Cusco, Perú. *Mastozoología Neotropical*, 19(1): 85-104.
- Méndez-Carvajal, P., Santamaría, E., & Garibaldi, C. (2004). Riqueza y diversidad de mamíferos silvestres en los remanentes de bosques de la Reserva Forestal El Montuoso, Panamá, p. 161-171.
- Méndez-Carvajal, P.G. (2012). Censo preliminar de Primates en la Reserva Natural Chucantí, provincia de Darién, República de Panamá. *Mesoamericana*, 16(3), 22-29.
- Méndez-Carvajal, P. G. (2014). The Orion Camera System, a new method for deploying camera traps in tree canopy to study arboreal primates and other mammals: a case study in Panama. *Mesoamericana*, 18(1), 9-23.
- Méndez-Carvajal, P., Peñafiel, M., Zapata, A., & Berguido. G. (2015). The Panamanian Climbing Rat, Mammalia, Rodentia, Cricetidae, *Tylomys panamensis* (Gray, 1873). new report in Darien. *Tecnociencia*, 17(1), 47-56.
- Méndez-Carvajal, P. G., de Huertas, I.G., Pineda, K.M.G., Moreno, R.S., Peñafiel, M.A., Girón-Rengifo, A. S., Méndez-Carvajal, E., González-Hernández, P.A., & Ortiz, Angélica (2020). Potencial regenerativo de bosques de galería en base a diversidad y abundancia de mamíferos en la Reserva Forestal El Montuoso y afluentes del río La Villa, Herrera, Panamá. *Mesoamericana*, 24(1), 58-76.

- Méndez-Carvajal, P.G. (2021). El mono araña gris del Darién es encontrado después de 70 años. *Imagina*, 15, 51-52.
- Méndez-Carvajal, P.G., Rodríguez, M., Pozo-Montuy, G., Chaves, O., Sanchez-Porras, R., Gutierrez-Pineda, K.M., Spaan, D., Ramos, E., Orantes, K. (2022). Geoffroy's Spider Monkey *Ateles geoffroyi* Kuhl, 1820. In: R.A. Mittermeier, K.E. Reuter, A.B. Rylands, L. Jerusalinsky, C. Schwitzer, K.B. Strier, J. Ratsimbazafy and T. Humle (eds.), *Primates in Peril: The World's 25 Most Endangered Primates 2022–2023*. IUCN SSC Primate Specialist Group, International Primatological Society, Washington, 8–10.
- Mijango-Ramos, Z., de Stapf, M.S. Vergara, C. & Mendieta, J. (2020). Diversidad de Árboles y Arbustos en la Reserva Privada Cerro Chucantí en Darién, Panamá. *Tecnociencia*, 22(1), 17-36.
- Miller, M. J., Angehr, G. R., Ridgely, R. S., Lopez Ch., O. G., Arauz, J., Campos, C., E., & Buitrago-Rosas, D. (2015). Annotated checklist of the birds (Aves) of Cerro Hoya National Park, Azuero Peninsula, Panamá. *Check List*, 11(2), 1585. <https://doi.org/10.15560/11.2.1585>
- Morelos-Juárez, C., Tapia, A., Conde, G., & Peck, M. (2015). Diet of the critically endangered brown-headed spider monkey (*Ateles fusciceps fusciceps*) in the Ecuadorian Chocó: Conflict between primates and loggers over fruiting tree species (No. e1963). PeerJ PrePrints.
- Mosquera-Muñoz, D. M., Corredor, G., Cardona, P., & Armbrrecht, I. (2014). Fototrampeo de aves caminadoras y mamíferos asociados en el piedemonte de Farallones de Cali. *Bol. Cient. Mus. Hist. Nat. U. de Caldas*, 18 (2), 144-156.
- Navarro-Sigüenza, A. G., Gómez-de Silva, H., Gual-Díaz, M., Sánchez-González, L.A., Pérez-Villafaña, M., & Rendón-Correa A. (2014). La importancia de las aves del bosque mesófilo de montaña de México. M. Gual-Díaz y A. Rendón-Correa (Comps.), *Bosques mesófilos de montaña de México: diversidad, ecología y manejo*, 279-299.
- Ortiz, O. O., Baldini, R.M., Berguido, G., & Croat, T.B.. (2016). New species of *Anthurium* (Araceae) from Chucantí nature reserve, eastern Panama. *Phytotaxa*, 255(1), 47-56.

- Park, K. J. (2015). Mitigating the impacts of agriculture on biodiversity: bats and their potential role as bioindicators. *Mammalian Biology*, 80, 191-204.
- Payan, E. & de Oliveira, T. (2016). *Leopardus tigrinus*. The IUCN Red List of Threatened Species 2016: e.T54012637A50653881. <http://dx.doi.org/10.2305/IUCN.UK.2016-2.RLTS.T54012637A50653881.en>
- Portillo-Reyes, H., & Elvir, F. (2013). Distribución de felinos en áreas naturales protegidas de Honduras. *Revista Mexicana de Mastozoología (Nueva Época)*, 3(1), 1-10.
- Reid, F. (1987). A field guide to the mammals of Central America and Southeast Mexico. Oxford University Press.
- Ríos-Uzeda, B., Wallace, R.B., Aranibar, H., & Veitch, C. (2001). Evaluación de mamíferos medianos y grandes en el bosque semideciduo del alto Tuichi (PN y ANMI Madidi, Depto. La Paz). *Ecología en Bolivia*, 36, 31-38.
- Rodgers, T. W. & Kapheim, K.M. (2017). A High-Elevation Record of the Little Spotted Cat (*Leopardus tigrinus oncilla*) from Western Panama. *The Southwestern Naturalist*, 62(3), 225-227.
- Rowcliffe, J. M., Field, J., Turvey, S.T., & Carbone, C. (2008). Estimating animal density using camera traps without the need for individual recognition. *Journal of Applied Ecology*, 45(4), 1228-1236.
- Sánchez, D. (2015). El Parque Nacional Volcán Barú: Ecosistemas y Biodiversidad que aportan a la Economía de Panamá: Edición Semestral| Volumen 3, Número 1| Enero-Junio 2015. *Revista Plus Economía*3(1), 44-52.
- Sánchez-Brenes, R., & Moya-Calderón, M. (2018). Biodiversidad en fincas cafetaleras de Rincón de Mora, San Ramón, Alajuela, Costa Rica. *Pensamiento Actual*, 18(31), 68-86.
- Sánchez-Porras, R., Esquivel, K.C., & Vásquez, Y.M. (2021). Abundancia relativa, diversidad y patrones de actividad de mamíferos terrestres medianos y grandes, sendero Pájaro Sombrilla, Reserva Biológica Alberto Manuel Brenes, Alajuela, Costa Rica. *Pensamiento Actual*, 21(36).

- Smith, E. P. & van Belle, G. (1984). Nonparametric estimation of species richness. *Biometrics*, 1,119-129.
- Tirira, D.G., Nathalia, F., Alfonso-Cortes, F., Morelos-Juárez, C., Méndez-Carvajal, P.G., Gutiérrez-Pineda, K.M., Montilla, S., Hernández-Jaramillo, A., & Morales-Jiménez, A. (2022). *Ateles fusciceps* Gray (1866), Colombia, Ecuador, Panama (2006, 2012, 2014, 2016, 2022). In: R.A. Mittermeier, K.E. Reuter, A.B. Rylands, L. Jerusalinsky, C. Schwitzer, K.B. Strier, J. Ratsimbazafy and T. Humle (eds.), *Primates in Peril: The World's 25 Most Endangered Primates 2022–2023*, IUCN SSC Primate Specialist Group, International Primatological Society, Washington, DC., 127-132.
- Tenorio-Jiménez, R. (2007). Monumento Nacional Guayabo, pasado precolombino de Costa Rica. MINAE, ACCVC.
- Walker, M. J., Dorrestein, A., Camacho, J.J., Meckler, L.A., Silas, K.A., Hiller, T., & Haelewaters, D. (2018). A tripartite survey of hyperparasitic fungi associated with ecto-parasitic flies on bats (Mammalia: Chiroptera) in a neotropical cloud forest in Panama. *Parasite*, 25(19) [10.1051/parasite/2018017](https://doi.org/10.1051/parasite/2018017)
- Whittaker, R. H. (1960). Vegetation of the Siskiyou mountains, Oregon, and California. *Ecological Monographs*, 30, 279-338.
- Valdés, V. V. (2009). Impactos positivos y negativos de la introducción de animales exóticos en Panamá. *Tecnología en Marcha*. 22(2): 91-97.
- Angehr, G. R., Christian, D. G., & Aparicio, K. M. (2004). A survey of the Serranía de Jungurudó, an isolated mountain range in eastern Panama. *Bulletin of the British Ornithologists' Club*.
- van Roosmalen, M. G., Mittermeier, R.A., & Fleagle, J.G. (1988). Diet of the northern bearded saki (*Chiropotes satanas chiropotes*): a neotropical seed predator. *American Journal of Primatolog.*, 14(1), 11-35.
- Villalobos-Chaves, D., Padilla-Alvárez, S., & Rodríguez-Herrera, B. (2016). Seed predation by the wrinkle-faced bat *Centurio senex*: a new case of this unusual feeding strategy in Chiroptera. *Journal of Mammalogy*, 97(3), 726-733.



OPTIMIZACIÓN DE OPERACIONES EN DISTRIBUIDORA MEDIANTE PERT/CPM PARA DETERMINAR ACTIVIDADES CRÍTICAS

OPTIMIZATION OF DISTRIBUTOR OPERATIONS USING PERT/CPM TO DETERMINE CRITICAL ACTIVITIES

Alejandra Massiel Morán Montenegro

Universidad de Panamá, Facultad de Ingeniería, Lic. en Ingeniería Industrial, Auditoría y Gestión de Procesos, Panamá.

alejandra.moran03@up.ac.pa

<https://orcid.org/0000-0002-5531-0984>

Jhonny Alexander Dávila González

Universidad de Panamá, Facultad de Ingeniería, Lic. en Ingeniería Industrial, Auditoría y Gestión de Procesos, Panamá.

jhonny.davila@up.ac.pa

<https://orcid.org/0000-0003-0940-2703>

Julio Trujillo González

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

julio.trujillo@up.ac.pa

<https://orcid.org/0000-0002-3664-8058>

Fecha de recepción: 17 de agosto de 2023

Fecha de aceptación: 19 de octubre de 2023

DOI <https://doi.org/10.48204/j.tecno.v26n1.a4656>

RESUMEN

En un entorno empresarial dinámico y competitivo, la gestión eficiente de proyectos y operaciones es crucial para el éxito sostenible. El análisis PERT (Program Evaluation and Review Technique) y CPM (Critical Path Method) han emergido como herramientas poderosas para optimizar operaciones y procesos. Estos métodos permiten una planificación estratégica precisa al identificar rutas críticas, tiempos de operación y recursos clave. En este artículo, exploramos la aplicación de PERT/CPM en una distribuidora en Panamá para abordar la falta de visibilidad sobre las áreas de mejora en sus operaciones. Mediante la recopilación de datos y la creación de un diagrama de precedencia, se estableció una representación gráfica de las operaciones. La aplicación de PERT/CPM identifica la ruta crítica y las operaciones clave que afectan la duración total del proceso. Con esta información, se logró un diseño

estratégico para reducir los días de operación y mejorar la eficiencia. Además, se ilustra cómo estos resultados se tradujeron en un diagrama de Gantt, que visualiza la planificación de actividades a lo largo del tiempo. La metodología PERT/CPM no solo revela áreas de enfoque, sino que también proporciona una base sólida para decisiones informadas y optimización continua. En última instancia, esta aplicación demuestra cómo el análisis PERT/CPM se convierte en un recurso valioso para impulsar la eficiencia operativa y el rendimiento en proyectos empresariales.

PALABRAS CLAVES

PERT, CPM, Recolección de datos, Análisis de datos, implementar.

ABSTRACT

In a dynamic and competitive business environment, efficient project and operations management is crucial for sustainable success. The PERT (Program Evaluation and Review Technique) and CPM (Critical Path Method) analyses have emerged as powerful tools for optimizing operations and processes. These methods enable precise strategic planning by identifying critical paths, operation times, and key resources. In this article, we delve into the application of PERT/CPM in a distributor in Panama to address the lack of visibility into areas for operational improvement. Through data collection and the creation of a precedence diagram, a graphical representation of operations was established. The application of PERT/CPM identifies the critical path and key operations impacting the total process duration. With this information, a strategic design was achieved to reduce operation days and enhance efficiency. Additionally, it illustrates how these results were translated into a Gantt chart, visualizing activity planning over time. The PERT/CPM methodology not only reveals areas of focus but also provides a solid foundation for informed decisions and ongoing optimization. Ultimately, this application showcases how PERT/CPM analysis becomes a valuable resource for driving operational efficiency and performance in business projects.

KEY WORDS

PERT, CPM, data collection, data analysis, implement.

INTRODUCCIÓN

La gestión y ejecución de proyectos es una tarea compleja que requiere una planificación meticulosa y una coordinación efectiva. Un proyecto se define como un esfuerzo planificado y coordinado con un objetivo específico, un alcance claramente definido y un conjunto de recursos y actividades destinados a lograr un resultado deseado dentro de parámetros establecidos, como tiempo, costo y calidad. En palabras de Nassir Sapag Chain (2011), "un proyecto es, ni más ni menos, la búsqueda de una solución inteligente al planteamiento de un problema tendiente a resolver, entre tantos, una necesidad humana" (p.1).

La administración de proyectos se centra en la organización y dirección de recursos para alcanzar los objetivos del proyecto. Según Galán (2022), "La administración de proyectos es la metodología mediante la cual es posible emplear, de manera eficiente, los recursos con los que cuenta un determinado proyecto". Para lograr esto, se emplean diversas técnicas y modelos, entre los que destacan el enfoque de revisión y evaluación de proyectos (PERT) y el método de la ruta crítica (CPM). Recientes estudios, como el de Kenar et al. (2023), han aplicado variantes del método PERT, como el Fuzzy PERT, en la planificación de proyectos de construcción, demostrando su eficacia en la gestión del tiempo. Por otro lado, Danfulani et al. (2023) destacan la importancia del método CPM en la programación óptima de proyectos de construcción.

Este artículo se adentrará en un caso de estudio específico en una distribuidora de la ciudad de Panamá. Esta distribuidora enfrenta desafíos que serán abordados utilizando la metodología CPM/PERT, con el objetivo de establecer criterios esenciales para la toma de decisiones y la planificación estratégica. Para llevar a cabo este proyecto, se utilizaron dos aplicaciones clave: POM QM y Excel QM.

Antecedentes

El método PERT (Program Evaluation and Review Technique) y CPM (Critical Path Method) son enfoques ampliamente utilizados en la gestión de proyectos. PERT, desarrollado por la Marina de los Estados Unidos en la década de 1950, se enfoca en manejar proyectos complejos y de alta incertidumbre al analizar múltiples rutas de tiempo posibles y asignar probabilidades a las estimaciones de duración. Por otro lado, CPM, desarrollado en paralelo por la compañía DuPont, se centra en proyectos con actividades bien definidas y tiempos determinísticos.

Ambos métodos comparten la idea fundamental de representar las actividades del proyecto como nodos en un gráfico, conectados por flechas que indican el flujo secuencial. Esto permite identificar la ruta crítica, que es la secuencia de actividades que determina la duración total del proyecto. Cualquier retraso en la ruta crítica afecta el tiempo de finalización del proyecto en su conjunto.

PERT destaca por su capacidad para manejar incertidumbre mediante la asignación de tres estimaciones de tiempo para cada actividad: optimista, más probable y pesimista. Utilizando una fórmula de cálculo basada en estas estimaciones, PERT calcula un tiempo esperado para cada actividad y para el proyecto en su conjunto, junto con una medida de variabilidad.

En contraste, CPM se basa en tiempos deterministas y busca la ruta más corta a través

del proyecto. Las estimaciones de duración se conocen con precisión y se usan para calcular los tiempos tempranos y tardíos de cada actividad, lo que permite identificar la ruta crítica y la holgura de las actividades no críticas.

Ambos métodos ofrecen ventajas únicas: PERT es valioso para proyectos inciertos, mientras que CPM es más adecuado para proyectos con plazos estrictos y actividades bien definidas. La combinación de ambas técnicas, conocida como PERT/CPM, ofrece un enfoque completo para la gestión de proyectos al considerar tanto la incertidumbre como los plazos determinísticos.

Descripción del problema y modelo matemático

En el entorno empresarial actual, la eficiencia operativa y la optimización de procesos son fundamentales para mantener la competitividad y maximizar la productividad. En este contexto, nos encontramos con una empresa que ha estado ejecutando sus operaciones sin la implementación formal de técnicas de gestión de proyectos como CPM (Critical Path Method, Método de la Ruta Crítica) o PERT (Program Evaluation and Review Technique, Técnica de Evaluación y Revisión de Programas). Aunque los procesos se han establecido y se han mantenido en funcionamiento, existe una falta de visibilidad sobre cuáles son las rutas críticas en la ejecución de estas operaciones. Sin estos datos, es mucho menos seguro encontrar la operación que se desee mejorar y que esté dentro de la ruta crítica, creando una situación en la que la empresa al tomar decisiones aleatorias con respecto a las operaciones, no están sacando el adecuado rendimiento ni se mejoran los días de producción de las diferentes operaciones.

El objetivo principal de este trabajo es determinar la ruta crítica de las operaciones de la empresa para identificar áreas clave que requieren enfoques específicos para la reducción de los días de operación. Se busca lograr una mayor eficiencia y agilidad en los procesos, minimizando los tiempos de ejecución y maximizando la utilización de los recursos disponibles.

El problema planteado se puede desglosar de la siguiente manera:

Falta de Ruta Crítica Identificada: Aunque la empresa ha estado operando, no se ha realizado un análisis detallado para determinar cuáles son las operaciones cruciales que afectan directamente la duración total del proceso. Esto lleva a la falta de conocimiento sobre las áreas específicas que requieren mejoras para acelerar la ejecución general.

Eficiencia y Tiempo de Operación: La eficiencia y el tiempo de operación son vitales en un mercado dinámico y competitivo. La falta de una ruta crítica identificada dificulta

la toma de decisiones informadas sobre cómo y dónde enfocar los esfuerzos para reducir los tiempos y mejorar la eficiencia.

Necesidad de Reducción de Días de Operación: La reducción de los días de operación es esencial para lograr una entrega más rápida de productos o servicios y para optimizar el uso de los recursos. Identificar la ruta crítica permitirá a la empresa establecer prioridades y concentrar sus recursos en las áreas más impactantes.

Optimización y Enfoque Estratégico: La determinación de la ruta crítica proporcionará a la empresa una base sólida para una toma de decisiones estratégicas. Al conocer qué operaciones tienen el mayor impacto en la duración total del proceso, la empresa puede implementar mejoras específicas y asignar recursos de manera más efectiva.

MATERIALES Y MÉTODOS

Para la resolución de este proyecto, será necesario apoyarse en la teoría de la metodología PERT/CPM desde el uso de aplicaciones como POM QM y Excel QM, no obstante, solo son herramientas interpretaciones, posterior a eso, se introducen los datos en sus diferentes modalidades y de acuerdo con el funcionamiento de la misma aplicación.

- Definición de Objetivos:

Determinar la ruta crítica en las operaciones de una empresa distribuidora mediante el uso de PERT/CPM. Mejora la eficiencia en los procesos y reducir los días de operación.

- Recopilación de Datos:

Se busca identificar las operaciones y actividades involucradas en el proceso para poder recopilar datos sobre los tiempos de duración de cada actividad y las dependencias entre ellas.

- Creación del Diagrama de precedencia:

Construir un diagrama de precedencia que represente visualmente las actividades y sus relaciones de dependencia.

- Estimación de Tiempos:

Al ser una empresa que no cuenta con programación previa que permita construir los tiempos óptimos, más probable y pésimo, se tomaron los datos establecidos en días de duración por procesos.

- **Cálculo de Rutas Críticas:**

Aplicar la técnica de PERT/CPM para calcular los tiempos tempranos y tardíos, así como la holgura de cada actividad, con esto podemos identificar las rutas críticas, que son las secuencias de actividades que determinan la duración total del proceso.

- **Análisis y Priorización:**

Evaluar las operaciones en las rutas críticas identificadas y determinar las áreas que tienen el mayor impacto en la duración total del proceso y posteriormente priorizar las áreas que necesitan enfoques de reducción de días de operación para mejorar la eficiencia.

- **Diseño e Implementación de Mejoras:**

Desarrollar estrategias de reducción de tiempo para reducir los tiempos de operación en las áreas prioritarias.

- **Monitoreo y Evaluación:**

Implementar las mejoras y realizar un seguimiento continuo de los tiempos de operación y la eficiencia de las áreas enfoque y por último evaluar los resultados y compararlos con los tiempos previos a las mejoras.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Al ir desarrollando este caso de estudio, pudimos determinar los puntos necesarios para poder desarrollar el análisis PERT/CPM y posteriormente tener un método gráfico para poder entender el comportamiento real de su ruta de operaciones. Primeramente, fuimos definiendo las etapas secuenciales de las operaciones que maneja la Distribuidora, dando como resultado la siguiente tabla:

Tabla 1.

Recepción de mercancía hasta la distribución a clientes, incluyendo secuencia y tiempos.

No.	Actividad	Actividades Previa(s)	Duración (días)
1	Recepción de Mercancía en la Bodega	-	2
2	Almacenamiento y Etiquetado	1	3
3	Actualización del Inventario	2	1
4	Procesamiento de Pedidos	-	2
5	Selección y Empaque	3, 4	4
6	Generación de Documentos	4	1
7	Verificación de Calidad	5	2
8	Culminación del Pedido	6, 7	3
9	Facturación y Registro de Ventas	8	2
10	Revisión y Mejora Continua	9	1
11	Actualización de Seguimiento	8	1
12	Gestión de Devoluciones	8	3
13	Control de Calidad Interno	7	2
14	Aprobación de Controles de Calidad	13	2
15	Análisis de Eficiencia y Costos	10, 11, 12, 14	3

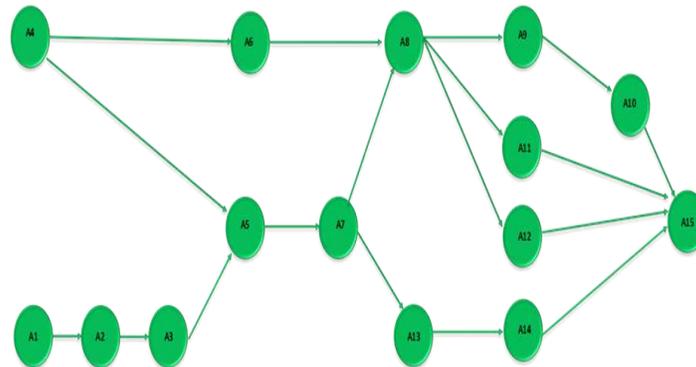
Al recopilar esta información, pudimos tener los datos necesarios para crear un mapa de precedencia en el que se vea de forma gráfica, el movimiento de las operaciones dentro de la bodega de la Distribuidora. esto dio como resultado los siguientes diagramas:

Tabla 2.

Abreviatura de actividades.

No.	abreviatura	Actividad
1	A1	Recepción de Mercancía en la Bodega
2	A2	Almacenamiento y Etiquetado
3	A3	Actualización del Inventario
4	A4	Procesamiento de Pedidos
5	A5	Selección y Empaque
6	A6	Generación de Documentos
7	A7	Verificación de Calidad
8	A8	Culminación del Pedido
9	A9	Facturación y Registro de Ventas
10	A10	Revisión y Mejora Continua
11	A11	Actualización de Seguimiento
12	A12	Gestión de Devoluciones
13	A13	Control de Calidad Interno
14	A14	Aprobación de Controles de Calidad
15	A15	Análisis de Eficiencia y Costos

Figura 1.
Diagrama de precedencia de las operaciones



Al crear este diagrama, los datos de las operaciones con sus respectivas precedencias quedan de manera gráfica y así se pueden ver los diferentes movimientos operacionales, no obstante, al utilizar los datos en la aplicación Excel QM, él mismo nos detalla la estructura con los tiempos de inicio más tempranos y los tiempos finales más tempranos (revisión hacia adelante), también nos muestra los tiempos iniciales más tardíos y los tiempos finales más tardíos, así como las holguras existentes (revisión hacia atrás)

Tabla 3.
Actividades con sus precedencias en tabla dentro de la aplicación Excel QM para construir el diagrama PERT.

Actividad	Tiempo	Precedencia 1	Precedencia 2	Precedencia 3	Precedencia 4
A 1	2				
A 2	3	A 1			
A 3	1	A 2			
A 4	2				
A 5	4	A 3	A 4		
A 6	1	A 4			
A 7	2	A 5			
A 8	3	A 6	A 7		
A 9	2	A 8			
A 10	1	A 9			
A 11	1	A 8			
A 12	3	A 8			
A 13	2	A 7			
A 14	2	A 13			
A 15	3	A 10	A 11	A 12	A 14

Dando como resultado la siguiente tabla:

Tabla 4.

Revisión hacia adelante (azul) y revisión hacia atrás (roja)

Actividad	Early Start	Early Finish	Late Start	Late Finish	Slack
A 1	0	2	0	2	0
A 2	2	5	2	5	0
A 3	5	6	5	6	0
A 4	0	2	4	6	4
A 5	6	10	6	10	0
A 6	2	3	11	12	9
A 7	10	12	10	12	0
A 8	12	15	12	15	0
A 9	15	17	15	17	0
A 10	17	18	17	18	0
A 11	15	16	17	18	2
A 12	15	18	15	18	0
A 13	12	14	14	16	2
A 14	14	16	16	18	2
A 15	18	21	18	21	0
Project		21			

El paso hacia adelante calcula los tiempos tempranos cuando las actividades pueden ocurrir y al paso hacia atrás calcula los tiempos tardíos. La diferencia entre los dos indica el grado de flexibilidad que hay en la ejecución de la actividad y este es cuantificado como holgura. estos valores son luego llevados a la tabla del diagrama PERT bajo este formato:

Figura 2.

Formato de celdas en Excel QM con distribución de los datos en el diagrama PERT.

Tiempo inicial más temprano
 Tiempo final más temprano
 Tiempo inicial más tardío
 Tiempo final más tardío
 (días, semanas, meses)
 Holgura (LF - EF)

ES	EF
LS	LF
H	
DURACIÓN	

Luego de tabular los datos y mostrarlos en el diagrama PERT, podemos determinar las operaciones que entran dentro de la ruta crítica, estos visualmente se ven en la tabla con las revisiones hacia adelante y hacia atrás, todas aquellas operaciones que lleven 0 en el slack o en la holgura, pertenecen a la ruta crítica:

Figura 3.

Diagrama PERT con operaciones, tiempos iniciales y finales más tempranos y tardíos respectivamente, mostrando a su vez la ruta crítica.

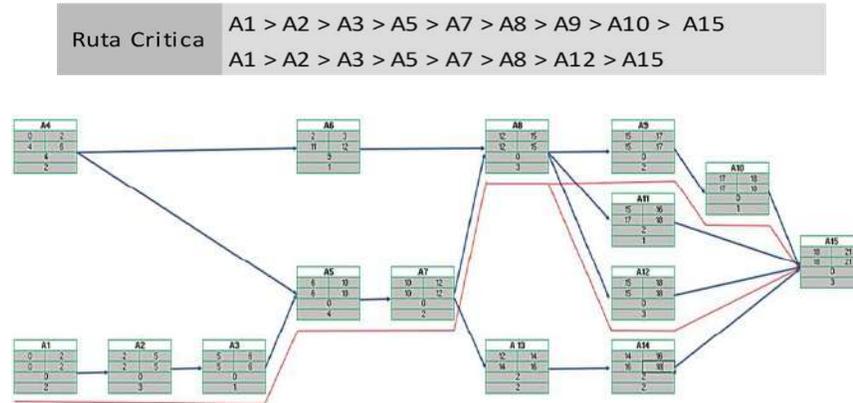
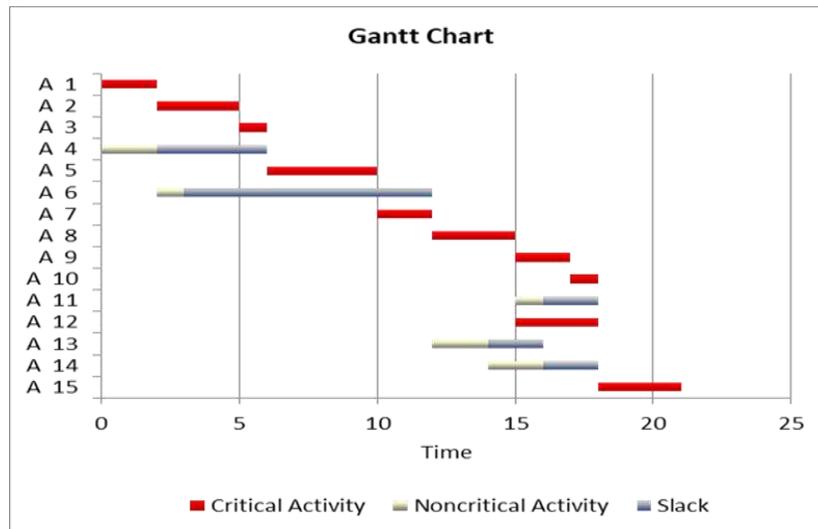


diagrama muestra las operaciones con todos sus tiempos, así como muestra la ruta crítica (línea roja) dando como resultado una operación completa de 21 días con 2 rutas que toman la menor cantidad de tiempo posible (21 días). Sabiendo estos valores, se puede crear un diagrama de Gantt, el cual proporciona una representación visual de cómo se planifican y programan las actividades en la ruta crítica a lo largo del tiempo.

Figura 4.

Diagrama de Gantt que muestra el desarrollo del ciclo de operaciones de la Distribuidora.



Al analizar los resultados obtenidos se pueden llegar a dos importantes respuestas. La primera es que debido a que ya se tiene una representación visual de la ruta crítica en la empresa, sabemos cuáles son las operaciones que verdaderamente necesitan un cambio en los tiempos de ejecución. Un ejemplo visual sería disminuir el tiempo de cualquiera de las operaciones dentro de la ruta crítica.

Tabla 5.

Actividad A1 pertenece a la ruta crítica y se le baja el tiempo original de 2 días a 1 día.

Actividad	Tiempo	Precedencia 1	Precedencia 2	Precedencia 3	Precedencia 4
A 1	1				
A 2	3	A 1			
A 3	1	A 2			
A 4	2				
A 5	4	A 3	A 4		
A 6	1	A 4			
A 7	2	A 5			
A 8	3	A 6	A 7		
A 9	2	A 8			
A 10	1	A 9			
A 11	1	A 8			
A 12	3	A 8			
A 13	2	A 7			
A 14	2	A 13			
A 15	3	A 10	A 11	A 12	A 14

Al reducir o aumentar los tiempos de las actividades que pertenecen a la ruta crítica, podemos ver que hay un cambio inmediato en cuanto a la duración del proceso completo.

Tabla 6.

Nueva duración de proyectos y cambios en los tiempos de inicio y finalización actualizados

Actividad	Early Start	Early Finish	Late Start	Late Finish	Slack
A 1	0	1	0	1	0
A 2	1	4	1	4	0
A 3	4	5	4	5	0
A 4	0	2	3	5	3
A 5	5	9	5	9	0
A 6	2	3	10	11	8
A 7	9	11	9	11	0
A 8	11	14	11	14	0
A 9	14	16	14	16	0
A 10	16	17	16	17	0
A 11	14	15	16	17	2
A 12	14	17	14	17	0
A 13	11	13	13	15	2
A 14	13	15	15	17	2
A 15	17	20	17	20	0
Project		20			

Por otra parte, si añadimos o quitamos tiempo de las actividades que no pertenecen a la ruta crítica, podremos ver que no afecta el tiempo total del proyecto.

Tabla 7.

Cambio de actividad A4 no perteneciente a la ruta crítica, aumento de 2 días a 4 días

Actividad	Tiempo	Precedencia 1	Precedencia 2	Precedencia 3	Precedencia 4
A 1	2				
A 2	3	A 1			
A 3	1	A 2			
A 4	4				
A 5	4	A 3	A 4		
A 6	1	A 4			
A 7	2	A 5			
A 8	3	A 6	A 7		
A 9	2	A 8			
A 10	1	A 9			
A 11	1	A 8			
A 12	3	A 8			
A 13	2	A 7			
A 14	2	A 13			
A 15	3	A 10	A 11	A 12	A 14

Tabla 8.

Duración de proyectos se mantiene (21 días) con dos días añadidos a la actividad 4

Actividad	Early Start	Early Finish	Late Start	Late Finish	Slack
A 1	0	2	0	2	0
A 2	2	5	2	5	0
A 3	5	6	5	6	0
A 4	0	4	2	6	2
A 5	6	10	6	10	0
A 6	4	5	11	12	7
A 7	10	12	10	12	0
A 8	12	15	12	15	0
A 9	15	17	15	17	0
A 10	17	18	17	18	0
A 11	15	16	17	18	2
A 12	15	18	15	18	0
A 13	12	14	14	16	2
A 14	14	16	16	18	2
A 15	18	21	18	21	0
Project		21			

CONCLUSIONES

La implementación de las metodologías PERT/CPM resulta efectiva para abordar desafíos operativos dentro de una empresa. Al identificar caminos críticos, tiempos de operación y recursos clave, estas técnicas proporcionan una hoja de ruta estratégica para minimizar los días de operación y maximizar la utilización de recursos. Se pudo mostrar desde la parte numérica el comportamiento de los días del proyecto en función del aumento o disminución del tiempo de este, esto para entender la importancia de la ruta crítica y de lo que asignar más recursos o minimizar los tiempos de igual forma se puede entender que la misma ayuda en la planificación estratégica de la empresa.

Otro aporte importante de los métodos PERT/CPM es que los mismos muestran una forma visual dependiendo de su dependencia de una actividad previa o no.

REFERENCIAS

- Aplicación Del Método Pert CPM en La Elaboración de Cacao. (s/f). Scribd. <https://es.scribd.com/presentation/484017120/OPE-pptx>
- Flores Tapia, C. E., & Flores Cevallos, K. L. (2020). Aplicación del modelo PERT-CPM a la gestión de proyectos de marketing empresarial. <http://file:///c:/users/usuario/desktop/2969texto%20del%20art%c3%adculo-11117-1-10-20210831.pdf>
- Danfulani, U. B., Mohammed, M., Reuben, B., Yakubu, J. A., & Digil, S. I. (2023). Application of critical path method (CPM) to optimal project scheduling: A case of mosul building company, Yola North local government, Adamawa State, Nigeria. *Fudutsinma Journal of Science*. 7(3), 186 - 192. <https://doi.org/10.33003/fjs-2023-0703-1860>.
- Galán, J. S. (2022). Administración de proyectos. Economipedia. <https://economipedia.com/definiciones/administracion-de-proyectos.html>
- Kenar, E., İpek, M., Dügenci, M., & Korkmaz, Ö. A. (2023). Applying the Fuzzy PERT Method in Project Management: A Real-Life Case Study. *International Journal of Computer Engineering and Software Engineering* 9(2), 123-132, <https://doi.org/10.22399/ijcesen.1262975>.

- Mendez, A. (2018). Diagrama PERT CPM Como elaborarlo paso a paso + Ejemplos. Plan de Mejora. <https://www.plandemejora.com/como-elaborar-un-diagrama-pert-cpm/>
- Pert y CPM Tema 4 Investigación de Opera. (s/f). Scribd. <https://es.scribd.com/document/517870511/PERT-Y-CPM-TEMA-4-INVESTIGACION-DE-OPERA>
- Sapag, N., Sapag, R., (2014), El estudio de proyectos. En S.A. Lily (Ed.), Preparación y evaluación de proyectos Sexta Edición. Mc Graw Hill.



Tecnociencia, Vol. 26, N°1: 165-175

Enero-Junio 2024

ISSN L 2415-0940

COMUNICACIÓN CORTA

DESERCIÓN ESTUDIANTIL DE LA LICENCIATURA EN DOCENCIA DE MATEMÁTICA DE LA UNIVERSIDAD DE PANAMÁ: UN ENFOQUE MEDIANTE ECUACIONES DIFERENCIALES ORDINARIAS

STUDENT DROPOUT FROM THE BACHELOR OF SCIENCE IN MATHEMATICS TEACHING AT THE UNIVERSITY OF PANAMA: AN APPROACH USING ORDINARY DIFFERENTIAL EQUATIONS

Julio Enrique Trujillo González

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

Julio.trujillo@up.ac.pa

<https://orcid.org/0000-0002-3664-8058>

Carolina Vejerano García

Universidad de Panamá, Facultad de Humanidades, Panamá.

carolina.yvg@gmail.com

<https://orcid.org/0009-0000-9501-3303>

Fecha de recepción: 4 de mayo de 2023

Fecha de aceptación: 23 de octubre de 2023

DOI <https://doi.org/10.48204/j.tecno.v26n1.a4660>

RESUMEN

El artículo presenta un modelo matemático basado en ecuaciones diferenciales ordinarias para analizar la dinámica del número de estudiantes en la Licenciatura en Docencia de Matemática en términos de su matrícula, reprobación, deserción y aprobación. Se establece un sistema de ecuaciones y se obtienen los puntos críticos del modelo, se analiza su estabilidad y se discuten las implicaciones de los parámetros del modelo.

PALABRAS CLAVES

Ecuaciones diferenciales, estudiantes, matrícula, reprobados, desertores, aprobados, tasas, estabilidad, puntos críticos.

ABSTRACT

The article presents a mathematical model based on ordinary differential equations to analyze the dynamics of the number of students in the Mathematics Education program in terms of enrollment, failure, dropout, and passing. A system of equations is established, and the critical points of the model are obtained, their stability is analyzed, and the implications of the model parameters are discussed.

KEY WORDS

Differential equations, students, enrollment, failures, dropouts, passing, rates, stability, critical points.

INTRODUCCIÓN

En noviembre de 1994, un grupo de profesores del Departamento de Física se reunió con el Rector Gustavo García de Paredes para analizar la continuidad del Profesorado en Física que este Departamento ofrecía en ese momento. Como consecuencia, surgió el interés de crear las carreras de profesorado para las áreas de Biología, Química y Matemática.

Los distintos departamentos acogieron bien la idea ese mismo año, el entonces Decano de la Facultad de Ciencias Naturales, Exactas y Tecnología, el profesor Aníbal Taymes, nombró una comisión de especialistas para elaborar un anteproyecto para la creación de las carreras especializadas en la formación de profesores para la enseñanza de la Biología, Física, Química y Matemática en Premedia y en Media del sistema educativo panameño.

La comisión representante del Departamento de Matemática estuvo conformada por los profesores Guadalupe Tejeda de Castillo, Analida Ardila, Josué Ortiz, Jorge Hernández, Edith de Hernández, Egberto Agard, Wenceslao De los Ríos, Belisario Brandao y José María Vásquez.

El 15 de diciembre de 1994 las comisiones le entregaron al Decano Taymes los planes de estudio solicitados y el 21 de diciembre de ese año fueron aprobados en la Junta de Facultad N° 294. En enero de 1995, el Decano entregó estos planes de estudio a la

Vicerrectoría Académica donde se paralizaron los trámites hasta la segunda mitad de 1997.

El 12 de diciembre de 1997, la Decana de la Facultad de Ciencias Naturales, Exactas y Tecnología, la profesora Elvia de De los Ríos, interesada en que fuera una realidad la formación de un nuevo docente para enseñar Biología, Química, Física y Matemática en Premedia y media, incorporó otros miembros a la comisión de 1994 para que se actualizara la propuesta hecha anteriormente. Esta comisión se ratificó en lo actuado por la comisión de 1994.

El 15 de diciembre de 1998, la Decana de la Facultad de Ciencias Naturales, Exacta y Tecnología formó otra comisión integrada por profesores de la facultad, personal de la Vicerrectoría Académica y de Planificación Universitaria para que analizaran la forma articular su propuesta con lo que demandaba el sistema educativo del país. A esta comisión se sumaron miembros de las Facultad de Ciencias Agropecuarias, Humanidades y Ciencias de la Educación. Esta comisión entregó su informe al Vicerrector Académico, Doctor rolando Murgas Torraza, en marco de 1999.

El 18 de febrero de 2000, se creó otra comisión integrada por profesores de las Facultades de Ciencias Naturales, Exacta y Tecnología y Ciencias de la Educación para continuar con la preparación de la propuesta de creación de las carreras de docencia en el área de las ciencias naturales y exactas. Esta comisión fue instalada oficialmente por el Vicerrector Académico de ese momento, Doctor Carlos Brandaris, el 31 de marzo de 2000.

Finalmente, el 1 de agosto de 2001, fueron aprobados los planes de estudio de las carreras de docencia en Biología, Física, Química y Matemática en el consejo Académico N° 33-01; y la Licenciatura en Docencia de la Matemática se ofreció a partir del primer semestre de 2002.

Fue un logro haber creado la Licenciatura en Docencia de Matemática; sin embargo, hay que adaptarse a las necesidades del sistema educativo panameño. Para tener una visión de todos los factores que intervienen, primero debemos conocer la situación actual de la población de los estudiantes y uno de estos factores es la deserción.

LA DESERCIÓN EN LA LICENCIATURA EN DOCENCIA DE MATEMÁTICAS

En el año 2012, se llevó a cabo una auditoría a las carreras de la Escuela de Matemática de la Facultad de Ciencias Naturales, Exactas y Tecnología de la Universidad de Panamá, a través del Consejo Nacional de Evaluación y Acreditación Universitaria de Panamá (CONEAUPA). Dicha gestión no es indefinida, ya que cada 6 años se realiza.

Debido a esto, es importante contar con información cuantitativa y cualitativa precisa de la situación actual de la carrera de Licenciatura en Docencia de Matemática, para poder elaborar estrategias de retención de los estudiantes y evitar la deserción.

La deserción es un problema en todos los niveles educativos. Tinto (1975) define dos tipos de deserción: los que no terminan la matrícula y los que no obtienen el título de licenciatura. En ambos casos existe una implicación a los recursos del país, ya que el estado invierte parte del PIB en estudiantes que abandonan sus estudios en el primer año (González-Campos et al., 2020; Sandoval-Palis et al., 2020).

Por lo tanto, la deserción y la repitencia son dos graves problemas para la eficiencia del sistema educativo. La deserción universitaria es la última consecuencia del fracaso, esto trae consecuencias para el futuro del estudiante y alarga el tiempo en la universidad, lo que conlleva a la baja autoestima, baja calidad de vida y disminución de sus probabilidades de ser un profesional preparado (Torres, 2015).

DATOS

Para esta evaluación se utilizaron los datos de la Licenciatura en Docencia de Matemática de los años 2010, 2011 y 2012, tomando en consideración los cuatros grupos de asignaturas que son: instrumental, general, especialidad básica y fundamental.

Utilizaremos los datos de Ardila et al. (2014), como ejemplo ver el cuadro 1 a 4 para estimar las siguientes tasas:

- La tasa deserción (λ) se define como el número de estudiantes que abandonaron la carrera entre el número total de estudiantes matriculados.
- La tasa de aprobación (β) es el número de estudiantes que aprobaron el año entre el número total de estudiantes matriculados.
- La tasa de reprobación (γ) se puede calcular como el cociente entre el número de estudiantes reprobados y el número total de estudiantes.
- La tasa de abandono (α) formalmente se puede estimar como el número de estudiantes que abandonaron el curso después de haber sido reprobados, dividido por el número total de estudiantes reprobados. Ya que el estudio fue exploratorio no se tomó en consideración esta variable, la estimaremos mediante la pendiente de la curva ajustada de los estudiantes reprobados y desertores.

Tabla 1.

Rendimiento académico de los estudiantes matriculados en la Licenciatura en Docencia de Matemática 2010, asignaturas instrumentales

ABREVIATURA	MATRICULADOS	REPROBADOS	DESERTORES	APROBADOS
FIS 171	11	0	3	8
FIS 172	10	0	1	9
INF 253	9	0	0	9
MAT 272	9	0	2	7
EST 231	8	0	0	8
EST 311	11	0	1	10
INF 441	7	0	0	7

Tabla 2.

Rendimiento académico de los estudiantes matriculados en la Licenciatura en Docencia de Matemática 2010, asignaturas generales

ABREVIATURA	MATRICULADOS	REPROBADOS	DESERTORES	APROBADOS
QM 171	9	1	1	7
BIO 171	14	6	2	6
ESP 120A	8	0	2	6
ING 120A	9	0	1	8
EDU FIS 213	8	0	0	8
FIS 303	11	0	0	11
BIO 342	7	0	0	7

Tabla 3.

Rendimiento académico de los estudiantes matriculados en la Licenciatura en Docencia de Matemática 2010, asignaturas fundamentales

ABREVIATURA	MATRICULADOS	REPROBADOS	DESERTORES	APROBADOS
MAT 170	11	5	1	5
MAT 141	11	1	5	5
MAT 151	12	3	2	6
MAT 212	8	0	2	6
MAT 252	6	1	0	5
MAT 261	6	0	1	5
MAT 251	5	0	0	5
MAT 262	7	0	0	7
MAT 331	13	5	0	8
MAT 351	11	5	2	4
MAT 352	12	0	1	11
MAT 353	13	3	0	10
MAT 421	14	0	0	14
MAT 355	9	4	3	2
MAT 431	15	0	0	15

Tabla 4.

Rendimiento académico de los estudiantes matriculados en la Licenciatura en Docencia de Matemática 2010, asignaturas de especialidad básica

ABREVIATURA	MATRICULADOS	REPROBADOS	DESERTORES	APROBADOS
DESEDU 131	9	0	1	8
PSIPED 132	10	0	0	10
DESEDU 142	11	0	1	9
PSIPED 211	7	0	1	6
DIDTEC 241	7	0	0	7
DESEDU 222	5	0	0	5
DIDTEC 232	7	0	0	7
MAT 321	12	0	0	12
CURRI 301	12	0	1	11
ADMSUP 341	11	0	0	11
MAT 342	15	0	2	13
PSIPED 322	9	0	0	9
EV.IN. 332	10	0	4	6
MAT 411	8	0	0	8
DIDTEC 461	7	0	1	6
DIDTEC 551	6	0	0	6

Teniendo en consideración los tres años (2010, 2011 y 2012), se estiman las tasas de cada grupo de materia.

Tabla 5.

Tasas de la población de la Licenciatura en Docencia de Matemática, asignaturas instrumentales

AÑO	λ	β	γ	α
2010	0.09	0.9	0	0.11
2011	0.17	0.8	0.01	0.11
2012	0.2	0.75	0.04	0.11

Tabla 6.

Tasas de la población de la Licenciatura en Docencia de Matemática, asignaturas generales

AÑO	λ	β	γ	α
2010	0.09	0.83	0.08	0.21
2011	0.53	0.4	0.06	0.21
2012	0.14	0.69	0.08	0.21

Tabla 7.

Tasas de la población de la Licenciatura en Docencia de Matemática, asignaturas fundamentales

AÑO	λ	β	γ	α
2010	0.11	0.71	0.16	0.12
2011	0	0.88	0.11	0.12
2012	0.15	0.74	0.11	0.12

Tabla 8.

Tasas de la población de la Licenciatura en Docencia de Matemática, asignaturas de especialidad básica

AÑO	λ	β	γ	α
2010	0.07	0.93	0	0
2011	0.18	0.81	0	0
2012	0.05	0.94	0	0

METODOLOGIA

El modelo que tomaremos se basa en ecuaciones diferenciales ordinarias para describir la dinámica del número de estudiantes matriculados, reprobados, desertores y aprobados por el tipo de asignatura global (general, fundamental e instrumental). Este modelo es producto de considerar los modelos presentados por Kermack & McKendrick (1927); Park, & Choe (2020) y Zhang, Cai, & Luo (2020).

Supongamos que hay una población de estudiantes N en la asignatura, y definamos las siguientes variables:

- $S(t)$: Número de estudiantes matriculados en el tiempo t .
- $R(t)$: Número de estudiantes reprobados en el tiempo t .
- $D(t)$: Número de estudiantes desertores en el tiempo t .
- $A(t)$: Número de estudiantes aprobados en el tiempo t .

Entonces, el modelo se puede expresar por el siguiente sistema de ecuaciones diferenciales ordinarias:

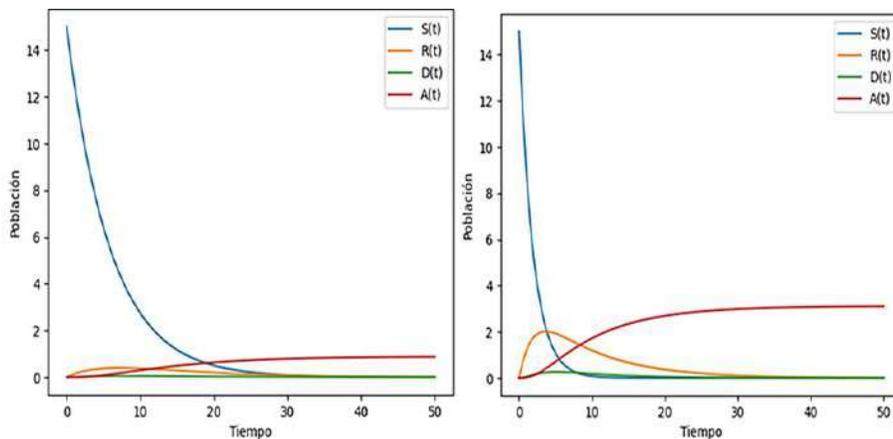
$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dS}{dt} = -\lambda S(t) \dots (1) \\ \frac{dR}{dt} = \gamma S(t) - \alpha R(t) \dots (2) \\ \frac{dD}{dt} = \alpha R(t) - \beta D(t) \dots (3) \\ \frac{dA}{dt} = \beta D(t) \dots (4) \end{array} \right.$$

La ecuación (1) indica que la tasa de cambio de estudiantes matriculados es igual a la tasa de deserción multiplicada por el número actual de estudiantes matriculados. La ecuación (2) indica que la tasa de cambio de estudiantes reprobados es igual a la tasa de reprobación multiplicada por el número actual de estudiantes matriculados, menos la tasa de abandono multiplicada por el número actual de estudiantes reprobados. La ecuación (3) indica que la tasa de cambio de estudiantes desertores es igual a la tasa de abandono multiplicada por el número actual de estudiantes reprobados, menos la tasa de deserción multiplicada por el número actual de estudiantes desertores. La ecuación (4) indica que la tasa de cambio de estudiantes aprobados es igual a la tasa de aprobación multiplicada por el número actual de estudiantes desertores.

Se tomaron en consideración $N = 15$ estudiantes y las tasas del 2011 para ver su comportamiento en la figura 1 y figura 2.

Figura. 1

Asignaturas instrumentales (Izquierda) y asignaturas generales (Derecha)



Considerando las tasas del 2011 de las asignaturas instrumentales, podemos analizar la dinámica del sistema. En particular, podemos calcular los puntos críticos y su estabilidad.

Los puntos críticos son aquellos donde las derivadas son iguales a cero.

$$S^* = 0, R^* = 0, D^* = 0, A^* = 0$$

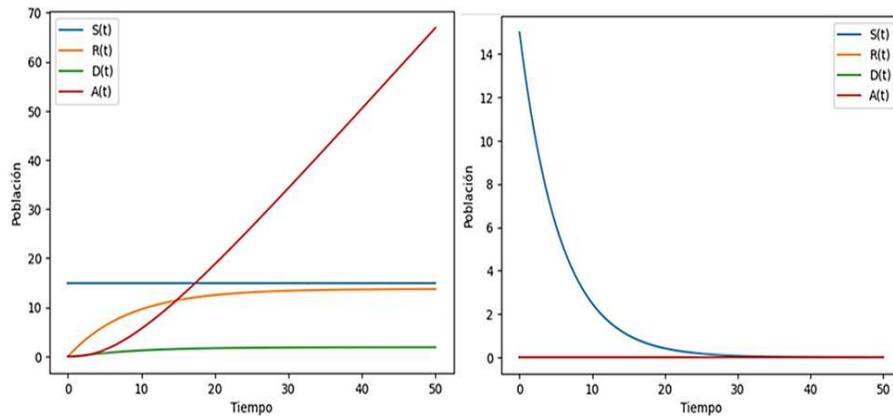
y

$$S^* = \frac{\beta}{\lambda}, R^* = \frac{\gamma}{\alpha}, D^* = \frac{\beta}{\gamma}, A^* = \frac{\beta\gamma}{\alpha\lambda}$$

El punto crítico corresponde cuando no hay población en el sistema y también cuando hay un número constante de estudiantes en cada categoría.

Figura. 2

Asignaturas fundamentales (Izquierda) y asignaturas de especialidad básica (Derecha)



Se calculo la matriz Jacobiana y se evaluaron sus valores propios. En este caso, la matriz Jacobiana es:

$$J = \begin{bmatrix} -\lambda & 0 & 0 & 0 \\ \gamma & -\alpha & 0 & 0 \\ 0 & \beta & -\beta & \alpha \\ 0 & 0 & \beta & 0 \end{bmatrix}$$

Evaluando los valores propios en el primer punto crítico, obtenemos cuatro valores propios negativos, lo que indica que este punto crítico es estable. En el segundo punto crítico, los valores propios son negativos para S^* y A^* , pero positivos para R^* y D^* , lo que indica que este punto crítico es inestable.

Estos parámetros sugieren que la tasa α es más baja que la tasa β , lo que podría indicar que el número de estudiantes aprobados siempre será mayor que el número de los que la abandonan. La tasa γ es muy baja, lo que indica que los estudiantes no suelen reprobado en las asignaturas instrumentales en la mayoría de los casos.

El análisis anterior se puede hacer en las demás materias y ver su estabilidad.

CONCLUSIONES

El análisis realizado sobre la dinámica de los estudiantes considerando el ejemplo las asignaturas instrumentales durante el año 2010 proporciona información valiosa para entender el comportamiento de los estudiantes.

Se encontró que la tasa de deserción es alta, lo que sugiere que muchos estudiantes abandonan estas asignaturas antes de finalizarlas. Sin embargo, la tasa de abandono después de reprobado es baja, lo que indica que los estudiantes que reprobado prefieren continuar en la asignatura en lugar de abandonarla. Además, la tasa de reprobación es muy baja, lo que sugiere que los estudiantes tienen un alto nivel de aprobación en estas asignaturas.

Al analizar los puntos críticos del modelo, se encontró que el punto crítico donde no hay población en el sistema es estable, lo que indica que una vez que los estudiantes abandonan la asignatura, es poco probable que regresen. El segundo punto crítico, donde hay un número constante de estudiantes en cada categoría, es inestable, lo que indica que cualquier perturbación en el sistema puede llevar a cambios drásticos en el número de estudiantes en cada categoría.

Hay que tener en consideración que la tasa de abandono (α) fue estimada y esto podría traer consigo cambios en el comportamiento de la población en el modelo.

En conclusión, estos resultados sugieren que es necesario enfocarse en reducir la tasa de deserción en las asignaturas instrumentales, ya que muchos estudiantes abandonan estas asignaturas antes de finalizarlas. Además, es importante seguir manteniendo una

alta tasa de aprobación y baja tasa de reprobación en estas asignaturas. Esto podría lograrse mediante la implementación de programas de apoyo académico y la mejora en la calidad de la enseñanza en estas asignaturas.

REFERENCIAS

- Ardila, A., & Murillo, M. (2014). Diagnóstico Académico-Curricular de la Licenciatura en Docencia de Matemática.
- González-Campos, J. A., Carvajal-Muquillaza, C. M., & Aspeé-Chacón, J. E. (2020). Modeling of university dropout 0000111 using Markov chains. *Uniciencia*, 34(1), 129– 146. <https://doi.org/10.15359/RU.34-1.8>
- Kermack, W. O., & McKendrick, A. G. (1927). A contribution to the mathematical theory of epidemics. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical and Physical Character*, 115(772), 700–721. <https://doi.org/10.1098/rspa.1927.0118>
- Park, H., & Choe, Y. (2020). Mathematical modeling for COVID-19 transmission with undetected cases. *Journal of Korean Medical Science*, 35(13), e143. <https://doi.org/10.3346/jkms.2020.35.e143>
- Sandoval-Palis, I., Naranjo, D., Vidal, J., & Gilar-Corbi, R. (2020). Early Dropout Prediction Model: A Case Study of University Leveling Course Students. *Sustainability* 2020, Vol. 12, Page 9314, 12(22), 9314. <https://doi.org/10.3390/SU12229314>
- Tinto, V. (1975). Dropout from Higher Education: A Theoretical Synthesis of Recent Research. *Review of Educational Research*, 45(1), 89. <https://doi.org/10.2307/1170024>
- Torres, M. (2015). Análisis de la deserción de los estudiantes de primer ingreso de la licenciatura en administración financiera y negocios internacionales de la Universidad de Panamá. Año 2014. Universidad de Panamá.
- Zhang, J., Cai, W., & Luo, S. (2020). Mathematical model of COVID-19 with preventive measures and optimal control analysis. *Chaos, Solitons & Fractals*, 140, 110123. <https://doi.org/10.1016/j.chaos.2020.110123>



FUNCIONES CLASE UNO DE BAIRE

FUNCTIONS OF BAIRE CLASS ONE

Jorge E. Hernández U.

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

jorgeelizerhernandezurieta@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0003-1153-1918>

Ángela Y. Franco

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

angela.franco@up.ac.pa

<https://orcid.org/0000-0002-7085-6870>

Fecha de recepción: 20 de junio de 2023

Fecha de aceptación: 24 de octubre de 2023

DOI <https://doi.org/10.48204/j.tecno.v26n1.a4661>

RESUMEN

Sea $\{f_n\}_{n=1}^{\infty}$, una sucesión de funciones continuas definidas en un intervalo I que converge puntualmente a la función f en I . Es bien conocido que la función f puede o no ser continua en I . Sin embargo, la función f posee algunas propiedades interesantes. El propósito de este artículo es usar esta idea para definir las funciones clase uno de Baire, estudiar sus propiedades algebraicas y probar que el límite uniforme de una sucesión de funciones de clases uno de Baire es también una función clase uno de Baire.

PALABRAS CLAVES

Continuidad, sucesión de funciones continuas, convergencia puntual, convergencia uniforme, funciones clase uno de Baire.

ABSTRACT

Let $\{f_n\}_{n=1}^{\infty}$, be a sequence of continuous functions defined on an interval I that converges pointwise to the function f on I . It is well known that the function f could be continuous or

not I . However, the

function f have some interesting properties. The purpose of this article is to use this idea in order to define the Baire class one functions, study their algebraic properties and prove that the uniform limit of a sequence of Baire class one functions is also a Baire class one function.

KEY WORDS

Continuity, sequence of continuous functions, pointwise convergence, uniform convergence, Baire class one functions.

INTRODUCCIÓN

El siguiente teorema es un resultado bien conocido en la teoría del análisis real (Barthle, 2014; Rudin, 2016).

Teorema 1 (Convergencia Uniforme y Continua): Sea $\{f_n\}_{n=1}^{\infty}$ una sucesión de funciones definidas en un intervalo I , $c \in I$ y $f: I \rightarrow \mathbb{R}$. Suponga que la sucesión $\{f_n\}_{n=1}^{\infty}$ converge uniformemente a f en I . Si cada función f_n es continua en c , entonces f es continua en c . Por lo tanto, si cada función f_n es continua en I , entonces f es continua en I .

La pregunta es qué ocurre si la sucesión de funciones $\{f_n\}_{n=1}^{\infty}$ converge sólo puntualmente a f en I . El siguiente ejemplo muestra que la convergencia uniforme es una condición necesaria para que se satisfaga el Teorema 1.

Ejemplo 1: Sea $\{f_n\}_{n=1}^{\infty}$ la sucesión de funciones continuas definidas en el intervalo $I = [0,1]$ por

$$f_n(x) = x^n$$

Note que

$$\lim_{n \rightarrow \infty} f_n(x) = \lim_{n \rightarrow \infty} x^n = 0, \quad \text{si } 0 \leq x < 1$$

y

$$\lim_{n \rightarrow \infty} f_n(x) = \lim_{n \rightarrow \infty} x^n = 1, \quad \text{si } x = 1$$

Así pues, la sucesión de funciones $\{f_n\}_{n=1}^{\infty}$ converge puntualmente a la función f en I , donde

$$f(x) = \begin{cases} 0 & , 0 \leq x < 1 \\ 1 & , x = 1 \end{cases}$$

Note que f no es continua en $I = [0,1]$ y no satisface la propiedad del valor intermedio.

En conclusión, el límite uniforme de una sucesión de funciones continuas es continuo, pero el límite puntual de una sucesión de funciones continuas puede no ser continuo. Sin embargo, las funciones que son límites puntuales de sucesiones de funciones continuas tienen propiedades muy importantes, las cuales se investigarán en este artículo. En particular, se investigará si las funciones clase uno de Baire poseen puntos de continuidad.

FUNCIONES CLASE UNO DE BAIRE

Definición 1: Sea $f: [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$ una función. f es una función de clase uno de Baire si f es el límite puntual de una sucesión de funciones continuas definidas en $[a, b]$

Ejemplo 2: La función $f: [0,1] \rightarrow \mathbb{R}$ definida por

$$f(x) = \begin{cases} 0 & , 0 \leq x < 1 \\ 1 & , x = 1 \end{cases}$$

es una función clase uno de Baire, la cual no es continua en $[0,1]$.

Ejemplo 3: Sea $f: [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$ una función continua. Considere la sucesión de funciones $\{f_n\}_{n=1}^{\infty}$ definidas en $[a, b]$ por

$$f_n(x) = f(x), \quad \text{para todo } n \geq 1, x \in [a, b].$$

Luego $\{f_n\}_{n=1}^{\infty}$ es una sucesión de funciones continuas en $[a, b]$ que converge puntualmente a f en $[a, b]$. Por lo tanto, f es una función clase uno de Baire.

Ejemplo 4: Sea $f: [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$ una función diferenciable en $[a, b]$. Se probará que la derivada f' es una función clase uno de Baire en $[a, b]$. En efecto, sin pérdida de generalidad, se supondrá que $f(a) = f(b)$ para todo $x > b$. Para cada $n \in \mathbb{N}$ defina la función $f_n: [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$ por

$$f_n(x) = \frac{f\left(x + \frac{1}{n}\right) - f(x)}{1/n}$$

Luego, $\{f_n\}_{n=1}^{\infty}$ es una sucesión de funciones continuas definidas en $[a, b]$. Además

$$\lim_{n \rightarrow \infty} f_n(x) = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{f\left(x + \frac{1}{n}\right) - f(x)}{1/n} = f'(x)$$

Así pues, $\{f_n\}_{n=1}^{\infty}$ es una sucesión de funciones continuas que converge puntualmente a f' en $[a, b]$. Por consiguiente, f' es una función clase uno de Baire en $[a, b]$.

En el siguiente teorema se presentan las propiedades algebraicas de las funciones clase uno de Baire

Teorema 2: Sean f y g funciones de clase uno de Baire en $[a, b]$

- i. Kf es una función clase uno de Baire en $[a, b]$, donde $K \in \mathbb{R}$.
- ii. $f + g$ es una función clase uno de Baire en $[a, b]$.
- iii. fg es una función clase uno de Baire en $[a, b]$.

Demostración:

- i. Como f es una función clase uno de Baire en $[a, b]$, existe una sucesión de funciones continuas $\{f_n\}_{n=1}^{\infty}$ definidas en $[a, b]$ que converge puntualmente a f en $[a, b]$. Sea $h_n = Kf_n$, entonces $\{h_n\}_{n=1}^{\infty}$ es una sucesión de funciones continuas definidas en $[a, b]$ que converge puntualmente a Kf en $[a, b]$. Por consiguiente Kf es una función clase uno de Baire.
- ii. Sean $\{f_n\}_{n=1}^{\infty}$ y $\{g_n\}_{n=1}^{\infty}$ dos sucesiones de funciones continuas definidas en $[a, b]$ que convergen puntualmente a f y g , respectivamente, en $[a, b]$. Luego $\{f_n + g_n\}_{n=1}^{\infty}$ es una sucesión de funciones continuas definidas en $[a, b]$ y que converge puntualmente a $f + g$ en $[a, b]$. Por lo tanto, $f + g$ es una función clase uno de Baire en $[a, b]$.
- iii. Esta demostración es similar a la (ii).

Teorema 3: Sea f es una función clase uno de Baire en $[a, b]$ y $h: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ es una función continua en \mathbb{R} . Entonces hof es una función clase uno de Baire en $[a, b]$.

Demostración:

Sea $\{f_n\}_{n=1}^{\infty}$ una sucesión de funciones continuas en $[a, b]$ que converge puntualmente a f en $[a, b]$. Luego, $\{hof_n\}_{n=1}^{\infty}$ es una sucesión de funciones continuas definidas en $[a, b]$. Además, como h es continua en $[a, b]$, para cada $x \in [a, b]$, se tiene que

$$\begin{aligned}\lim_{n \rightarrow \infty} (hof_n)(x) &= \lim_{n \rightarrow \infty} h(f_n(x)) \\ &= h\left(\lim_{n \rightarrow \infty} f_n(x)\right) \\ &= h(f(x)) \\ &= (hof)(x)\end{aligned}$$

Por lo tanto, la sucesión de funciones continuas, $\{hof_n\}_{n=1}^{\infty}$ converge puntualmente a hof en $[a, b]$. Así pues, hof es una función clase uno de Baire en $[a, b]$.

Notación: El conjunto de las funciones clase uno de Baire definidas en el intervalo $[a, b]$ se denota por B_1 . Así

$$B_1 = \{f: [a, b] \rightarrow \mathbb{R} / f \text{ es clase uno de Baire en } [a, b]\}$$

Del Ejemplo 3 se tiene que $\mathcal{C}([a, b], \mathbb{R}) \subsetneq B_1$, donde $\mathcal{C}([a, b], \mathbb{R})$ es el conjunto de las funciones continuas definidas en $[a, b]$.

Teorema 4: Sea $f: [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$ una función clase uno de Baire en $[a, b]$ y suponga que existe un $M > 0$ tal que

$$|f(x)| \leq M, \quad \text{para todo } x \in [a, b]$$

Entonces, existe una sucesión de funciones continuas $\{f_n\}_{n=1}^{\infty}$ definidas en $[a, b]$ que converge puntualmente a f en $[a, b]$ y tal que

$$|f_n(x)| \leq M, \quad \text{para todo } x \in [a, b] \text{ y } n \in \mathbb{N}$$

Demostración:

Sea $\{g_n\}_{n=1}^{\infty}$ una sucesión de funciones continuas definidas en $[a, b]$ que converge puntualmente a f en $[a, b]$. Para cada $n \in \mathbb{N}$ defina la función $f_n: [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$ por

$$f_n(x) = \begin{cases} -M, & \text{si } g_n(x) < -M \\ g_n(x), & \text{si } |g_n(x)| \leq M \\ M, & \text{si } g_n(x) > M \end{cases}$$

Sea $x \in [a, b]$. Si $g_n(x) < -M$, entonces como f es continua en x , existe un $\delta > 0$ tal que $g_n(y) < -M$, para todo $y \in (x - \delta, x + \delta) \cap [a, b]$. Por lo tanto, $f_n(y) = -M$ para todo $y \in (x - \delta, x + \delta) \cap [a, b]$; lo cual implica que f_n es continua en x . El mismo resultado se obtiene si $g_n(x) > M$. Suponga que $|g_n(x)| < M$. Luego, como g_n es continua en x , existe un $\delta > 0$ tal que $|g_n(x)| < M$ para todo $y \in (x - \delta, x + \delta) \cap [a, b]$. Por lo tanto $f_n(y) = g_n(y)$ para todo $y \in (x - \delta, x + \delta) \cap [a, b]$. Como g_n es continua en x , se tiene que f_n es continua en x . Suponga que $g_n(x) = -M$. Sea $0 < \varepsilon < \frac{M}{4}$. Como g_n es continua en x , existe un $\delta > 0$ tal que

$$|g_n(y) - g_n(x)| < \varepsilon \text{ siempre que } y \in (x - \delta, x + \delta) \cap [a, b].$$

O sea

$$|g_n(y) + M| < \varepsilon < \frac{M}{4}, \text{ siempre que } y \in (x - \delta, x + \delta) \cap [a, b].$$

Sea $y \in (x - \delta, x + \delta) \cap [a, b]$. Note que $g_n(y) \leq -M$

- Si $g_n(y) \leq -M$, entonces
$$|f_n(y) - f_n(x)| = |-M + M| = 0 < \varepsilon$$
- Si $|g_n(y)| < M$, entonces
$$|f_n(y) - f_n(x)| = |g_n(y) - g_n(x)| < \frac{\varepsilon}{4} < \varepsilon.$$

Por consiguiente, f_n es continua en x .

El mismo resultado se obtiene si $g_n(x) = M$.

En conclusión, se tiene que f_n es continua en $[a, b]$, para todo $n \geq 1$. Así, $\{f_n\}_{n=1}^{\infty}$ es una sucesión de funciones continuas definidas en $[a, b]$ y tal que $|f_n(x)| \leq M$, para todo $x \in [a, b]$ y $n \geq 1$.

Sea $x \in [a, b]$, entonces por hipótesis $|f(x)| \leq M$

- Suponga que $|f(x)| < M$. Como

$$\lim_{n \rightarrow \infty} g_n(x) = f(x)$$

Se tiene que existe un $N_1 \geq 1$ tal que $|g_n(x)| < M$, para todo $n \geq N_1$. Esto implica que

$$\begin{aligned} \lim_{n \rightarrow \infty} f_n(x) &= \lim_{\substack{n \rightarrow \infty \\ n > N_1}} f_n(x) = \lim_{\substack{n \rightarrow \infty \\ n > N_1}} g_n(x) \\ &= \lim_{n \rightarrow \infty} g_n(x) = f(x) \end{aligned}$$

- Si $f(x) = -M$, entonces

$$\lim_{n \rightarrow \infty} g_n(x) = -M$$

Luego existe un $N_1 \geq 1$ tal que $f_n(x) = g_n(x)$ ó $f_n(x) = -M$, para todo $n \geq N_1$. Por lo tanto,

$$f(x) = \lim_{n \rightarrow \infty} g_n(x) = \lim_{\substack{n \rightarrow \infty \\ n \geq N_1}} f_n(x) = \lim_{n \rightarrow \infty} f_n(x)$$

Así pues, $\{f_n\}_{n=1}^{\infty}$ es una sucesión de funciones continuas convergente puntualmente a f en $[a, b]$ tal que cada f_n es acotado por M .

Teorema 5: Sea $\{f_n\}_{n=1}^{\infty}$ una sucesión de funciones clase uno de Baire en $[a, b]$ y sea $\sum_{n=1}^{\infty} M_n$ una serie de números reales positivos convergentes. Si $|f_n(x)| \leq M_n$ para todo $n \geq 1$ y $x \in [a, b]$, entonces la función $f(x) = \sum_{n=1}^{\infty} f_n(x)$ es una función clase uno de Baire en $[a, b]$.

Demostración:

Por el M-test de Weierstrass (Bressoud, 2007; Schramm, 2008), la función f está bien definida en $[a, b]$. Para cada $n \geq 1$ existe una sucesión $\{g_m^n\}_{m=1}^{\infty}$ de funciones continuas que converge puntualmente a f_n en $[a, b]$. Por el Teorema 4 se puede suponer que $|g_m^n(x)| \leq M_n$ para todo $m \geq 1$ y $x \in [a, b]$. Para cada $n \geq 1$ defina la

función

$$h_n = g_n^1 + g_n^2 + \cdots + g_n^n$$

Note que $\{h_n\}_{n=1}^{\infty}$ es una sucesión de funciones continuas definidas en $[a, b]$.

Sea $x \in [a, b]$ y $\varepsilon > 0$. Por hipótesis existe un entero positivo N_1 tal que

$$\sum_{k=N_1+1}^{\infty} M_k < \varepsilon$$

Existe un $N \geq N_1$ tal que

$$|g_i^K(x) - f_K(x)| < \frac{\varepsilon}{N_1}, \text{ para todo } 1 \leq K \leq N_1, \quad i \geq N.$$

Sean $n \geq N$, entonces

$$\begin{aligned} |h_n(x) - f(x)| &= \left| \sum_{K=1}^n g_n^K(x) - \sum_{K=1}^{\infty} f_K(x) \right| \\ &\leq \sum_{K=1}^{N_1} |g_n^K(x) - f_K(x)| + \sum_{K=N_1+1}^n |g_n^K(x)| + \sum_{K=N_1+1}^{\infty} |f_K(x)| \\ &< \sum_{K=1}^{N_1} \left(\frac{\varepsilon}{N_1} \right) + \sum_{K=N_1+1}^n M_k + \sum_{K=N_1+1}^{\infty} M_k \\ &< \varepsilon + \varepsilon + \varepsilon = 3\varepsilon \end{aligned}$$

Por consiguiente, la sucesión $\{h_n(x)\}_{n=1}^{\infty}$ converge puntualmente a $f(x)$ en $[a, b]$. Esto implica que f es una función clase uno de Baire en $[a, b]$.

Teorema 6: Sea $\{f_n\}_{n=1}^{\infty}$ una sucesión de funciones clase uno de Baire en $[a, b]$, si $\{f_n\}_{n=1}^{\infty}$ converge uniformemente a f en $[a, b]$, entonces f es una función clase uno de Baire en $[a, b]$.

Demostración:

Como $\{f_n\}_{n=1}^{\infty}$ converge uniformemente a f en $[a, b]$, existe un número natural n_1 tal que

$$|f_{n_1}(x) - f(x)| < \frac{1}{2}, \quad \text{para todo } x \in [a, b]$$

De igual manera existe un número natural $n_2 > n_1$ tal que

$$|f_{n_2}(x) - f(x)| < \frac{1}{2^2}, \quad \text{para todo } x \in [a, b]$$

Continuando con este proceso, se obtiene una subsucesión $\{f_{n_k}\}_{k=1}^{\infty}$ de $\{f_n\}_{n=1}^{\infty}$ tal que

$$|f_{n_k}(x) - f(x)| < \frac{1}{2^k}, \quad \text{para todo } x \in [a, b]$$

Note que

$$\begin{aligned} |f_{n_{k+1}}(x) - f_{n_k}(x)| &\leq |f_{n_{k+1}}(x) - f(x)| + |f_{n_k}(x) - f(x)| \\ &< \frac{1}{2^{k+1}} + \frac{1}{2^k} \\ &< \frac{1}{2^k} + \frac{1}{2^k} = \frac{1}{2^{k-1}} \end{aligned}$$

Por lo tanto, $\{f_{n_{k+1}} - f_{n_k}\}_{k=1}^{\infty}$ es una sucesión de funciones de clase uno de Baire en $[a, b]$ tal que

$$\begin{aligned} |f_{n_{k+1}}(x) - f_{n_k}(x)| &< M_k = \frac{1}{2^{k-1}}, \quad \text{para todo } x \in [a, b] \\ \sum_{k=1}^{\infty} M_k &= \sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{2^{k-1}} < \infty \end{aligned}$$

Note además que

$$\begin{aligned} \sum_{k=1}^{\infty} (f_{n_{k+1}} - f_{n_k})(x) &= \lim_{p \rightarrow \infty} \sum_{k=1}^p (f_{n_{k+1}}(x) - f_{n_k}(x)) \\ &= \lim_{p \rightarrow \infty} (f_{n_{p+1}}(x) - f_{n_1}(x)) \\ &= f(x) - f_{n_1}(x) \end{aligned}$$

Luego, por el Teorema 5, $f - f_{n_1}$ es una función clase uno de Baire en $[a, b]$. Finalmente, por el Teorema 2, la función $f = (f - f_{n_1}) + f_{n_1}$ es una función clase uno de Baire en $[a, b]$.

Ejemplo 5: Sea $\{f_n\}_{n=1}^{\infty}$ la sucesión de funciones definidas en el intervalo $[0,1]$ por

$$f_n(x) = \begin{cases} \frac{1}{x}, & \text{si } x \geq \frac{1}{n} \\ n^2x, & \text{si } 0 \leq x < \frac{1}{n} \end{cases}$$

Note que cada función f_n es continua en $[0,1]$ y

- Si $0 < x \leq 1$, entonces $\lim_{n \rightarrow \infty} f_n(x) = \frac{1}{x}$
- Si $x = 0$, entonces $\lim_{n \rightarrow \infty} f_n(x) = 0$

Así pues, la sucesión de funciones continuas $\{f_n\}_{n=1}^{\infty}$ converge puntualmente a la función f en $[0,1]$, donde

$$f(x) = \begin{cases} \frac{1}{x}, & \text{si } 0 < x \leq 1 \\ 0, & \text{si } x = 0 \end{cases}$$

Por lo tanto, f es una función clase uno de Baire en $[0,1]$; sin embargo f no es acotada en $[0,1]$.

Teorema 7: Sea $f: [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$ una función continua en $(a, b]$ (respectivamente en $[a, b)$). Entonces f es una función clase uno de Baire en $[a, b]$.

Demostración:

Sea N un número natural tal que $\frac{1}{N} < b - a$. Para cada número natural $n \geq N$ defina la función $f_n: [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$

$$f_n(x) = \begin{cases} f(x), & \text{si } a + \frac{1}{n} < x \leq b \\ n \left[f\left(a + \frac{1}{n}\right) - f(a) \right] (x - a) + f(a), & \text{si } a \leq x \leq a + \frac{1}{n} \end{cases}$$

Note que $\{f_n\}_{n=N}^{\infty}$ es una sucesión de funciones continuas definidas en $[a, b]$ que converge puntualmente a f en $[a, b]$. Por lo tanto, f es una función clase uno de Baire. El caso $[a, b]$ se prueba de manera similar.

Teorema 8: Sean $f: [a, c] \rightarrow \mathbb{R}$ y $g: [c, b] \rightarrow \mathbb{R}$ funciones clase uno de Baire en $[a, c]$ y $[c, b]$, respectivamente tales que $f(c) = g(c)$. Considere la función $h: [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$ definida por

$$h(x) = \begin{cases} f(x), & a \leq x \leq c \\ g(x), & c \leq x \leq b \end{cases}$$

Entonces h es una función clase uno de Baire en $[a, b]$

Demostración:

Existe una sucesión de funciones continuas $\{f_n\}_{n=1}^{\infty}$ definidas en $[a, c]$ tal que

$$\lim_{n \rightarrow \infty} f_n(x) = f(x), \quad \text{para todo } x \in [a, c]$$

De igual manera, existe una sucesión de funciones continuas $\{g_n\}_{n=1}^{\infty}$ definidas en $[c, b]$ tal que

$$\lim_{n \rightarrow \infty} g_n(x) = g(x), \quad \text{para todo } x \in [c, b]$$

Sea N un número natural tal que $a < c - \frac{1}{N} < c < c + \frac{1}{N} < b$. Para cada número natural $n \geq N$ defina la función $h_n: [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$ por

$$h_n(x) = \begin{cases} f_n(x), & \text{si } a \leq x \leq c - \frac{1}{n} \\ n \left[f(c) - f_n \left(c - \frac{1}{n} \right) \right] (x - c) + f(c), & \text{si } c - \frac{1}{n} < x \leq c \\ n \left[g_n \left(c + \frac{1}{n} \right) - g(c) \right] \left(x - c - \frac{1}{n} \right) + g \left(c + \frac{1}{n} \right), & \text{si } c < x < c + \frac{1}{n} \\ g_n(x), & \text{si } c + \frac{1}{n} \leq x \leq b \end{cases}$$

Note que $\{h_n\}_{n=N}^{\infty}$ es una sucesión de funciones continuas definidas en $[a, b]$ y

- Si $a \leq x \leq c$, entonces $\lim_{n \rightarrow \infty} h_n(x) = \lim_{n \rightarrow \infty} f_n(x) = f(x) = h(x)$

- Si $c \leq x \leq b$, entonces $\lim_{n \rightarrow \infty} h_n(x) = \lim_{n \rightarrow \infty} g_n(x) = g(x) = h(x)$
- Si $x = c$, entonces $\lim_{n \rightarrow \infty} h_n(c) = \lim_{n \rightarrow \infty} f(c) = \lim_{n \rightarrow \infty} g(c) = h(c)$, ya que $f(c) = g(c)$; o sea que $\{h_n\}_{n=1}^{\infty}$ converge puntualmente a f en $[a, b]$.

Así pues, h es una función clase uno de Baire en $[a, b]$.

Teorema 9: Sea $c \in (a, b)$ y $h: [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$ una función continua en $[a, b] - \{c\}$. Entonces, h es una función clase uno de Baire en $[a, b]$.

Demostración:

Sea $f: [a, c] \rightarrow \mathbb{R}$ la restricción de h a $[a, c]$ y $g: [c, b] \rightarrow \mathbb{R}$ la restricción de h a $[c, b]$. Por lo tanto f es continua en $[a, c)$ y g es continua en $(c, b]$. Luego, por el Teorema 7, f es una función clase uno de Baire en $[a, c]$ y g es una función clase uno de Baire en $[c, b]$.

Note que

$$h(x) = \begin{cases} f(x), & a \leq x < c \\ g(x), & c \leq x \leq b \end{cases}$$

por consiguiente, por el Teorema 8, h es una función clase uno de Baire en $[a, b]$.

Como una consecuencia de los Teoremas 7,8,9 se obtiene el siguiente resultado

Teorema 10: Sea $f: [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$ una función y $Dc(f) = \{x \in [a, b] / f \text{ es discontinua en } x\}$. Si $Dc(f)$ es finito, entonces, f es una función clase uno de Baire en $[a, b]$.

Demostración:

Solo hay que aplicar los Teoremas 7,8,9 repetitivamente.

Ejemplo 6: Recuerde que una función $f: [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$ es una función escalonada si existe un conjunto finito $\{J_k: 1 \leq k \leq n\}$ de intervalos disjuntos, posiblemente degenerados, tal que $[a, b] = \cup_{k=1}^n J_k$ y, f es constante en cada J_k .

Como $Dc(f)$ es un conjunto finito, por el Teorema 10, f es una función clase uno de Baire en $[a, b]$.

Ejemplo 7: Considere la función de Johannes Thomae (Dunham,2005) $f: [0,1] \rightarrow \mathbb{R}$ definida por

$$f(x) = \begin{cases} 0, & \text{si } x \notin \mathbb{Q} \\ \frac{1}{q}, & \text{si } x = \frac{p}{q}, \quad (p, q) = 1 \\ 0, & \text{si } x = 0 \end{cases}$$

Se sabe que $Dc(f) = \mathbb{Q} \cap (0, 1]$, el cual es un conjunto infinito enumerable. Así, se puede escribir

$$Dc(f) = \mathbb{Q} \cap (0, 1] = \{r_1, r_2, r_3, \dots\}$$

Para cada número natural n defina la función $f_n: [0,1] \rightarrow \mathbb{R}$ por

$$f_n(x) = \begin{cases} f(r_k), & \text{si } x = r_k, \quad k = 1, 2, \dots, n \\ 0, & \text{en los otros casos} \end{cases}$$

Note que $Dc(f_n) = \{r_1, r_2, \dots, r_n\}$. Luego, por el Teorema 10 f_n es una función clase uno de Baire en $[0,1]$. Se probará que la sucesión de funciones $\{f_n\}_{n=1}^{\infty}$ converge uniformemente a f en $[0,1]$. En efecto, sea $\varepsilon > 0$. Luego, por la propiedad arquimedea existe un número natural N_1 tal que $\frac{1}{N_1} < \varepsilon$. Sólo hay un número finito de números racionales con denominadores menores que N_1 . Por lo tanto, existe un número natural $N > N_1$ tal que

$$f(r_k) < \frac{1}{N_1} < \varepsilon, \quad \text{para todo } k \geq N$$

- Si $x = 0$, entonces $f(x) = f(0) = f_n(0) = 0$ para todo $n \geq 1$. Por lo tanto

$$|f_n(x) - f(x)| = 0 < \varepsilon, \quad \text{para todo } n \in \mathbb{N}$$

- Si $x \in [0,1] - \mathbb{Q}$, entonces $f_n(x) = f(x) = 0$ para todo $n \geq 1$. Por lo tanto

$$|f_n(x) - f(x)| = 0 < \varepsilon, \quad \text{para todo } n \in \mathbb{N}$$

- Supongamos que $x \in \mathbb{Q} \cap (0, 1]$. Entonces, existe un $k \in \mathbb{N}$ tal que $x = r_k$. Luego, si $n \geq N$ se tiene que

$$f_n(x) = f_n(r_k) = f(r_k) = f(x), \quad \text{si } k \leq n$$

Si $k > n$, entonces

$$f_n(x) = f_n(r_k) = 0 \quad \text{y} \quad f(x) = f(r_k) = \frac{1}{q}, \quad \text{donde, } x = r_k = \frac{p}{q}, \quad (p, q) = 1$$

Luego

$$|f_n(x) - f(x)| = 0 < \varepsilon, \quad \text{si } k \leq n$$

$$|f_n(x) - f(x)| = f(r_k) < \varepsilon, \quad \text{si } k > n > N$$

Así pues,

$$|f_n(x) - f(x)| < \varepsilon, \quad \text{para todo } x \in [0,1] \quad \text{y} \quad n \geq N$$

Lo que implica que la sucesión de funciones clase uno de Baire $\{f_n\}_{n=1}^{\infty}$ converge uniformemente a f en $[0,1]$. Finalmente, por el Teorema 6, f es una función clase uno de Baire en $[0,1]$.

Observación: Si en lugar de definir $f(0) = 0$ en el Ejemplo 7, se define $f(0) = p$, $p \in \mathbb{R}$, $p \neq 0$. Entonces

$$Dc(f) = \mathbb{Q} \cap [0,1] \quad \text{y} \quad D(f) = I_r \cap [0,1]$$

y f es una función clase uno de Baire en $[0,1]$. La demostración es prácticamente igual a la del Ejemplo 7.

Ejemplo 8: Sea E un subconjunto cerrado, nunca denso (o sea que $E = \bar{E}$ no contiene intervalos abiertos) del intervalo $[a, b]$ tal que $a, b \in E$. Como $[a, b] - E$ es un conjunto abierto y no vacío de número reales, él se puede expresar como

$$[a, b] - E = \bigcup_{n=1}^{\infty} (a_n, b_n)$$

donde los intervalos (a_n, b_n) son disjuntos dos a dos.

Para cada $n \in \mathbb{N}$ tome $c_n = \frac{a_n + b_n}{2}$ y sea $\{z_n\}$ una sucesión de números reales.

Defina la función $f: [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$ por

- $f(x) = 0$, para todo $x \in E$
- $f(c_n) = z_n$, para todo $n \in \mathbb{N}$
- f es lineal en $[a_n, c_n]$ y $[c_n, b_n]$; o sea que f conecta los puntos $(a_n, f(a_n))$, $(c_n, f(c_n))$ con un segmento y los puntos $(c_n, f(c_n))$, $(b_n, f(b_n))$ con un segmento.

Note que $a_n, b_n \in E$, para todo $n \in \mathbb{N}$. Por lo tanto, $f(a) = f(a_n) = f(b_n) = f(b) = 0$, para todo $n \in \mathbb{N}$. Luego, por la definición de f , se tiene que $|f(x)| \leq |f(c_n)| = |z_n|$ para todo $x \in (a_n, b_n)$. Además, $f(x) > 0$ para todo $x \in (a_n, b_n)$ si $z_n > 0$; $f(x) < 0$ para todo $x \in (a_n, b_n)$ si $z_n < 0$ y $f(x) = 0$ para todo $x \in [a_n, b_n]$ si $z_n = 0$.

Sean $c, d \in [a, b]$ tal que $f(c) < k < f(d)$.

Supongamos que $c \in E$, entonces $f(c) = 0 < k < f(d)$. Esto implica que $d \notin E$; por lo tanto, existe un $n \in \mathbb{N}$ tal que $d \in (a_n, b_n)$. Luego, $f(a_n) = 0 < k < f(d)$. Por la definición de f , se tiene que $f(a_n) = 0 < k < f(d) \leq f(c_n) = z_n$. Por la linealidad de f en $[a_n, c_n]$, se tiene que existe un $x \in (a_n, c_n)$ tal que $f(x) = k$.

Igual resultado se obtiene si $d \in E$. Así que suponga que $c, d \notin E$. Luego existen $m, n \in \mathbb{N}$ tal que $c \in (a_m, b_m)$ y $d \in (a_n, b_n)$.

- Si $z_m = 0$, entonces $f(c) = 0 = f(a_n) < k < f(d) \leq z_n = f(c_n)$ por la linealidad de f en $[a_n, c_n]$, se tiene que existe un $x \in (a_n, c_n)$ tal que $f(x) = k$.
- Un resultado similar al anterior se obtiene si se supone que $z_n = 0$.
- Suponga que $z_m > 0$, entonces $0 \leq f(c) < k < f(d)$. Por lo tanto, $f(a_n) = 0 < k < f(d) \leq f(c_n)$. Luego, por la linealidad de f en $[a_n, c_n]$, se tiene que existe un $x \in (a_n, c_n)$ tal que $f(x) = k$.
- Un resultado similar al anterior se obtiene si se supone que $z_n < 0$.
- Suponga que $z_m < 0 < z_n$. Si $k = 0$, entonces $f(a_m) = k = 0$. Si $k < 0$, entonces $f(c_m) = z_m \leq k < 0 = f(b_m)$. Por la linealidad de f en $[c_m, b_m]$, existe un $x \in [c_m, b_m)$ tal que $f(x) = k$.

Así, en cualquier caso, existe un $x \in (a, b)$ tal que $f(x) = k$. Por consiguiente f tiene la propiedad del valor intermedio en $[a, b]$.

Se probará que f es una función clase uno de Baire en $[a, b]$. En efecto, para cada $n \in \mathbb{N}$ defina la función $f_n: [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$ por

$$f_n(x) = \begin{cases} f(x), & \text{si } x = \bigcup_{i=1}^n (a_i, b_i) \\ 0, & \text{en los otros casos} \end{cases}$$

- Sea $x \in E$, entonces $x \notin \bigcup_{n=1}^{\infty} (a_n, b_n)$. Esto implica que $f_n(x) = 0$, para todo $n \in \mathbb{N}$. Por lo tanto

$$\lim_{n \rightarrow \infty} f_n(x) = 0 = f(x)$$

- Sea $x \in [a, b] - E = \bigcup_{n=1}^{\infty} (a_n, b_n)$. Entonces existe un $n_0 \in \mathbb{N}$ tal que $x \in (a_{n_0}, b_{n_0})$. Luego $f_n(x) = f(x)$ para todo $n \geq n_0$. Por lo tanto

$$\lim_{n \rightarrow \infty} f_n(x) = \lim_{\substack{n \rightarrow \infty \\ n \geq n_0}} f_n(x) = \lim_{\substack{n \rightarrow \infty \\ n \geq n_0}} f(x) = f(x)$$

Así pues, $\{f_n\}_{n=1}^{\infty}$ converge puntualmente a f en $[a, b]$. Por otro lado, por la definición de f_n , se tiene que cada f_n es continua en $[a, b]$. En conclusión, $\{f_n\}_{n=1}^{\infty}$ es una sucesión de funciones continuas que converge puntualmente a f en $[a, b]$. Por consiguiente, f es una función clase uno de Baire en $[a, b]$.

Finalmente, se probará que f es continua en $[a, b]$ sí, y sólo sí, $\{z_n\}_{n=1}^{\infty}$ es una sucesión convergente a cero.

- Suponga que f es continua en $[a, b]$ y que la sucesión $\{z_n\}_{n=1}^{\infty}$ no converge a cero. Luego existe un $\varepsilon_0 > 0$ y una subsucesión $\{z_{n_k}\}_{k=1}^{\infty}$ de $\{z_n\}_{n=1}^{\infty}$ tal que

$$(*) \quad |z_{n_k}| > \varepsilon_0, \quad \text{para todo } k \in \mathbb{N}$$

Como $c_{n_k} \in [a, b]$ para todo $k \in \mathbb{N}$, existe una subsucesión $\{c_{n_{k_j}}\}_{j=1}^{\infty}$ de $\{c_{n_k}\}_{k=1}^{\infty}$ tal que

$$\lim_{j \rightarrow \infty} c_{n_{k_j}} = c \in [a, b]$$

Suponga que $c \notin E$, entonces existe un $m \in \mathbb{N}$ tal que $c \in (a_m, b_m)$. Sea

$$\delta_0 = \frac{1}{2} \min \{c - a_m, b_m - c\} > 0$$

Como los intervalos abiertos (a_n, b_n) son disjuntos dos a dos, se tiene que

$$|c_{n_{k_j}} - c| \geq \delta_0, \quad \text{para todo } n_{k_j} > m$$

lo que contradice que $\{c_{n_{k_j}}\}_{j=1}^{\infty}$ converge a c . Así pues, $c \in E$.

Por otro lado, como f es continua en c , se tiene que

$$0 = f(c) = f\left(\lim_{j \rightarrow \infty} c_{n_{k_j}}\right) = \lim_{j \rightarrow \infty} f(c_{n_{k_j}}) = \lim_{j \rightarrow \infty} z_{n_{k_j}}$$

Lo que contradice (*). Por consiguiente,

$$\lim_{n \rightarrow \infty} z_n = 0$$

- Suponga ahora que

$$\lim_{n \rightarrow \infty} z_n = 0$$

Por la definición de f , se tiene que f es continua en $\bigcup_{n=1}^{\infty} (a_n, b_n)$. Sea $x \in E$ y $\varepsilon > 0$. Entonces $f(x) = 0$ y existe un número natural N tal que

$$|z_n| < \varepsilon, \quad \text{para todo } n \geq N$$

Luego, por la definición de f , se tiene que

$$|f(y)| \leq |z_n| < \varepsilon, \quad \text{para todo } y \in \bigcup_{n=N}^{\infty} (a_n, b_n)$$

Por lo tanto,

$$|f(y) - f(x)| = |f(y)| < \varepsilon, \quad \text{para todo } y \in \bigcup_{n=N}^{\infty} (a_n, b_n)$$

Por otro lado, como $f(a_n) = f(b_n) = 0$ para todo $n \in \mathbb{N}$, por la definición de f , existe un $\delta > 0$ tal que $a_n + \delta < b_n$, $a_n < b_n - \delta$ y

$$|f(y)| < \varepsilon, \quad \text{para todo } y \in (\bigcup_{n=1}^{N-1} (a_n, a_n + \delta)) \cup (\bigcup_{n=1}^{N-1} (b_n - \delta, b_n))$$

Suponga que $|x - y| < \delta$, $y \in \bigcup_{n=1}^{N-1} (a_n, b_n)$. Luego existe un n_0 , $1 \leq n_0 \leq N - 1$ tal que $y \in (a_{n_0}, b_{n_0})$. Por lo tanto $y \in (a_{n_0}, a_{n_0} + \delta)$ ó $y \in (b_{n_0} - \delta, b_{n_0})$. Esto implica que

$$|f(y) - f(x)| = |f(y)| < \varepsilon$$

Finalmente, si $y \in E$, entonces

$$|f(x) - f(y)| = 0$$

Se ha probado así, que existe un $\delta > 0$ tal que

$$|f(x) - f(y)| < \varepsilon, \text{ siempre que } |y - x| < \delta, y \in [a, b].$$

Esto implica que f es continua en $x \in E$. En conclusión, f es continua en $[a, b]$.

CONCLUSIONES

1. Dada una sucesión de funciones continuas $f_n : I \rightarrow \mathbb{R}$ y $f : I \rightarrow \mathbb{R}$ una función; si la sucesión $\{f_n\}_{n=1}^{\infty}$ converge uniformemente a f en I , entonces la función f es continua en I . Sin embargo, si la convergencia es puntual en I no se puede asegurar que f es continua en I (Folland, 2007; Gordon, 2001).
2. Toda función continua $f : [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$ es el límite puntual de una sucesión de funciones continuas $\{f_n\}_{n=1}^{\infty}$ en $[a, b]$. Por lo tanto, $\mathcal{C}([a, b], \mathbb{R}) \subsetneq B_1$.
3. Del Teorema 2 se deduce que B_1 es un espacio vectorial sobre \mathbb{R} . Además, $\mathcal{C}([a, b], \mathbb{R})$ es un subespacio de B_1 .
4. Si $f : [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$ es una función de clase uno de Baire acotada en $[a, b]$ y si $|f(x)| \leq M$, para todo $x \in [a, b]$ entonces existe una sucesión de funciones continuas $\{f_n\}_{n=1}^{\infty}$ definidas en $[a, b]$ que converge puntualmente a f en $[a, b]$ y tal que $|f_n(x)| \leq M$ para todo $x \in [a, b]$ y $n \in \mathbb{N}$.

5. $\{f_n\}_{n=1}^{\infty}$ es una sucesión de funciones clase uno de Baire en $[a, b]$ que converge uniformemente a la función $f: [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$ en $[a, b]$, entonces f es también una función clase uno de Baire en $[a, b]$.
6. Si $f: [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$ es una función tal que el conjunto $Dc(f) = \{x \in [a, b] / f \text{ es discontinua en } x\}$ es finito, entonces f es una función clase uno de Baire en $[a, b]$.
7. Un resultado fundamental del análisis real es que si $\{f_n\}_{n=1}^{\infty}$ es una sucesión de funciones continuas definidas en un intervalo $I = [a, b]$ que converge puntualmente a la función $f: I \rightarrow \mathbb{R}$, entonces el conjunto $C_f = \{x \in I : f \text{ es continua en } x\}$ es denso en I . Por consiguiente, si $g: [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$ es una función continua clase uno de Baire, entonces g es continua en un subconjunto denso de $[a, b]$ (Gordon, 2001; Natanson, 2016; Olmsted, 2009).

REFERENCIAS

- Barthle, D. R., & Sherbert, R. G (2014). Introduction to Real Analysis. John Wiley & Sons.
- Bressoud, D. M. (2007). A Radical Approach to Real Analysis. 2nd Edition, (Mathematical Association of America Textbooks). The Mathematical Association of America.
- Dunham, W. (2005). The Calculus Gallery; Masterpieces from Newton to Lebesgue. Princeton University Press.
- Folland, G. B. (2007). Real Analysis: Modern Techniques and Their Applications. Wiley. USA.
- Gordon, R. A. (2002). Real Analysis. A First Course. Addison Wesley. USA.
- Natanson, I. R. (2016). Theory of Functions of Real Variable. Volume I. Dover Publications, Inc. USA.

Olmsted, J. M. H. (2009). *Advanced Calculus*. American Mathematical Society. USA.

Rudin, W. (2016). *Principles of Mathematical Analysis*. McGraw - Hill.

Schramm, M. J. (2008). *Introduction to Real Analysis*. Dover.



EVALUACIÓN DE LOS SERVICIOS ECOSISTÉMICOS DEL COMunal EL COLMÓN, MACARACAS, PANAMÁ

EVALUATION OF THE ECOSYSTEM SERVICES OF THE EL COLMÓN COMMUNITY, MACARACAS, PANAMA

Edgar Saucedo

Universidad Especializada de las Américas, Extensión de Azuero, Maestría en Gestión y Evaluación de Impacto Ambiental, Panamá.

saucevas06@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0003-4331-7844>

Lourdes E. Arosemena P

Universidad Especializada de las Américas, Extensión de Azuero, Maestría en Gestión y Evaluación de Impacto Ambiental, Panamá.

lourdes.rosemena.8@udelas.ac.pa

<https://orcid.org/0000-0003-1779-6896>

Félix Camarena

Universidad de Panamá, Centro Regional de Azuero, Maestría en Gestión Ambiental, Panamá.

felix.camarena@up.ac.pa

<https://orcid.org/0000-0002-5601-3252>

Fecha de recepción: 14 de noviembre de 2022

Fecha de aceptación: 9 de noviembre de 2023

DOI <https://doi.org/10.48204/j.tecno.v26n1.a4665>

RESUMEN

Con la investigación se evaluó el nivel de importancia de los servicios ecosistémicos (SE) que provee el Bosque El Colmón de Macaracas a la provincia de Los Santos. El tipo de estudio es descriptivo porque identifica y evalúa el nivel de importancia de los SE. Se utilizó una matriz de evaluación que mide el nivel de importancia de cada uno de los SE, previa observación e identificación de estos. Para su aplicación, se recabó, información por un período de cinco meses de trabajo de campo a través de observación directa, se realizaron recorridos cada quince días por los senderos del bosque. También se usó cámaras trampa y la aplicación de encuesta comunitaria a una muestra representativa de residentes en áreas cercanas al bosque. Se logró identificar tres tipos de servicios: de regulación y soporte (8 beneficios), socioculturales (4 beneficios) y de abastecimiento (7 beneficios). Estos resultados son concluyentes de un buen estado de conservación del bosque, indicando esto, que aún se está a tiempo para que los tomadores de decisiones y la población en general actúen en pro de la conservación de esta área protegida.

PALABRAS CLAVES

Biodiversidad, El Colmón de Macaracas, Nivel de importancia, Servicios ecosistémicos.

ABSTRACT

The research evaluated the level of importance of the ecosystem services (SE) provided by the El Colmón de Macaracas Forest to the province of Los Santos. The type of study is descriptive because it identifies and evaluates the level of importance of SEs. An evaluation matrix was used that measures the level of importance of each of the SE, after observation and identification of them. For its application, information was collected for a period of five months of fieldwork through direct observation, tours were made every fifteen days along the forest trails. Camera traps and community survey were also used to a representative sample of residents in areas near the forest. It was possible to identify three types of services: regulation and support (8 benefits), sociocultural (4 benefits) and supply (7 benefits). These results are conclusive of a good state of conservation of the forest, indicating this, that there is still time for decision makers and the population in general to act in favor of the conservation of this protected area.

KEY WORDS

Biodiversity, El Colmón de Macaracas, Level of importance, Ecosystem services.

INTRODUCCIÓN

El ambiente ofrece recursos que generan ganancias directas al igual que recursos como el agua, alimento, aire, suelo y bienestar espiritual o mental. Se infiere que un buen porcentaje de las áreas protegidas han sido establecidas con el objeto de conservar la biodiversidad, además de otros beneficios tales como: la provisión de servicios, la regulación de otros ecosistemas de importancia cultural y proporción de facilidades para actividades recreativas (Pabon et al., 2008).

La Evaluación de los Ecosistemas del Milenio de las Naciones Unidas (MEA por sus siglas en inglés), señala que, aproximadamente, el 60 por ciento de los servicios ecosistémicos (SE) a nivel mundial están degradados o utilizados de manera no sostenible (MEA, 2005). Además, detalla una lista de beneficios que proporcionan las áreas protegidas, ellos son: biodiversidad, empleo, alimentos, agua, valores culturales y espirituales, salud y recreación, conocimiento, mitigación del cambio climático, mitigación de desastres, servicios de polinización y materiales.

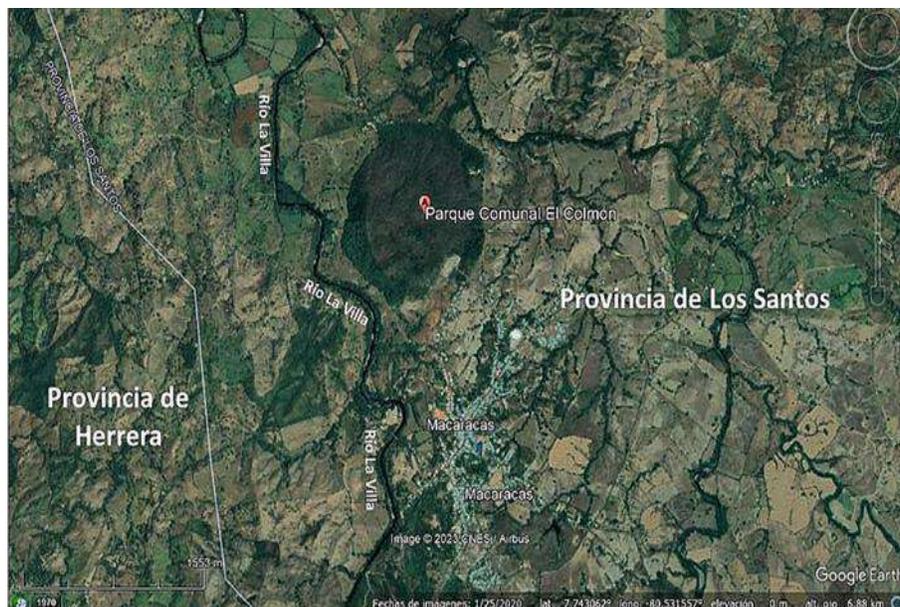
Se han creado casi 120 000 áreas protegidas a nivel mundial para su conservación y estas representan un aproximado de 12 % de la superficie terrestre y 1 % de las áreas marinas (Pabon et al., 2008).

Existe también una estrecha vinculación entre las áreas protegidas y sus alrededores con los grupos humanos que las habitan, toda vez que se generan servicios ambientales que el ser humano disfruta y que aportan al desarrollo socioeconómico del país (Centro Nacional de Competitividad Panamá - CNC, 2011).

En Panamá, a pesar de ser un país territorialmente pequeño, la diversidad biológica es sorprendente. Aproximadamente, habitan el 3,4% de las especies de anfibios del mundo, 2,3 % de reptiles, 9 % de aves, 4,8 % de mamíferos y el 3,3 % de especies de plantas de la diversidad mundial. Además, presenta 1 300 especies endémicas (Gaceta oficial No. 28 679, 2018). Además, cuenta con 120 áreas protegidas de acuerdo con el Sistema Nacional de áreas Protegidas (SINAP) que representa 31,8 % de la superficie terrestre y el 13,5 % de las áreas marinas, de las cuales 16 se encuentran en la provincia de Los Santos (Gaceta Oficial No. 28 679, 2018).

Figura 1.

Localización de El Colmón en Macaracas, Panamá (Google Maps).



Una de estas áreas protegidas es el bosque comunal El Colmón de Macaracas, el cual es un ejemplo de fuente de servicios o beneficios ambientales. Este bosque fue declarado “tierra no adjudicable” en 1918 mediante Ley 27 del 27 de diciembre de 1918 durante el gobierno del presidente Dr. Belisario Porras, con el propósito de preservar las fuentes de agua, uso racional de madera para leña y construcción para los

habitantes de Macaracas y áreas circundantes. Este bosque se constituye, como la reserva más antigua del país, (cumple hoy día más de un centenar de años de su creación) y, a pesar de eso, la población y las autoridades desconocen los SE que esta área protegida provee.

Con relación a lo arriba señalado, Panamá cuenta con la Ley General del Ambiente (Ley 41 de 1 de julio de 1998) que promueve el uso sostenible de los recursos naturales (Gaceta Oficial No. 23 578, 1998).

El Consejo Municipal de Macaracas emitió el 30 de octubre de 1940, el acuerdo No. 1, donde se establece como bosque comunal, con lo que se canceló el corte de madera debido a la tala descontrolada de árboles maderables.

Hoy día es vital para la protección y conservación de la biodiversidad y para el fomento de la educación ambiental y ecoturística.

La investigación evaluó el nivel de importancia de los servicios ecosistémicos que ofrece el Bosque Comunal El Colmón de Macaracas.

MATERIALES Y MÉTODOS

La investigación se realizó en el bosque comunal El Colmón de Macaracas, área protegida de la Provincia de Los Santos, Panamá, con una extensión territorial de 1,36 km², coordenadas 7° 44' 40.5486" -80° 33' 35.6682".

Se recabó información por un período de cinco meses de trabajo de campo con el apoyo de herramientas como la observación directa (realizada durante los recorridos hechos cada quince días) y cámaras trampas ubicadas cerca de las charcas de agua y áreas de alimentación; además, se aplicaron encuesta a una muestra representativa de sesenta personas residentes en el área cercana al bosque. Finalmente, para evaluar el nivel de importancia de los SE encontrados se aplicó la matriz diseñada por la Ingeniera Forestal Ana C. Castañeda. Los criterios para realizar la evaluación de los SE que ofrece el área protegida en estudio fueron: cobertura, oferta, permanencia, periodicidad y nivel de satisfacción. Para la evaluación de cada criterio, se otorgó 1 (uno) como valor más bajo y 10 (diez) como valor más alto, manteniendo intervalos de cinco.

Se calculó el nivel de importancia a través de la suma de los indicadores de cobertura, oferta, permanencia, periodicidad y nivel de satisfacción. El resultado nos indica, el grado de significancia de un SE cuyo valor estará considerado en un rango de uno a cincuenta.

I: CO + OF + PE + PER + NS

I: nivel de importancia; CO: cobertura; OF: oferta; PE: permanencia;

PER: periodicidad; NS: nivel de satisfacción.

La información recabada mediante observación directa en campo y los resultados obtenidos de la encuesta fueron procesados con el programa Excel, lo que nos permitió presentar tablas y gráficos para mejor comprensión de esta y elaborar un informe detallado de los resultados y conclusiones para entregar a UDELAS, MiAmbiente Regional de Los Santos y Agencia de El Colmón, Municipio de Macaracas. El informe fue acompañado por videos cortos y boletín informativos para compartirlo con MiAmbiente, MEDUCA (centros educativos del distrito de Macaracas).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Con el apoyo de cámaras trampa ubicadas en sitios estratégicos se logró registrar la presencia de diferentes especies de la fauna del lugar, en donde se encontraron 52 géneros siendo la clase aves la que se encontró en mayor porcentaje con 58,5 %.

Hubo diferentes hallazgos, especies sobresalientes como el felino Yaguaroundi (primera vez registrado con evidencia visual en esta área) captado por las cámaras trampa ubicadas en diferentes puntos de El Colmón y, en una de ellas, se ve junto a una cría; también se captó la presencia de otros carnívoros como el coyote (primera vez registrado con evidencia visual en el área), organismos estos que cumplen un papel ecológico importante en el control de roedores y de otras especies pequeñas, ya que son carnívoros por excelencia como señalan Posada (2017) y Satalier (2017) en sus respectivas investigaciones. Ambas especies ocupan los eslabones superiores de la cadena trófica en el bosque.

Adicionalmente, se registraron otros organismos, que podrían ser presas de estos carnívoros, entre ellos: el armadillo, ñeque, mapache, aves de pequeño tamaño como las tortolitas, rabiblanca y reptiles; entre los que se cuentan, iguana verde y moracho de quebrada (Satalier, 2017), lo cual es indicativo de que se mantiene el equilibrio ecológico del bosque.

Se observan aves ya registradas en esta área protegida, por eBird, siendo ellas, el Cuco ardilla (Bienteveo, 2018; Tángara, 2020); además, de especies poco comunes en un Bosque Seco Tropical; como el momotus coroniazulado, tucán pico iris y el halcón

peregrino (especie migratoria). Según Ridgely & Gwynne (2005), en su obra Guía de las Aves de Panamá, señalan que hay registro de la primera especie (Momotus coroniazulado) en la Península de Azuero, sin embargo, no existe registro en el bosque El Colmón. También especifican que el tucán pico iris está ausente en las tierras bajas secas y abiertas del lado este de la Península de Azuero, área de ubicación del bosque seco tropical El Colmón; aunque en nuestros recorridos se logró avistarlo en el dosel

del bosque y registrar su presencia. Este hecho pone en evidencia que El Colmón puede ser utilizado por algunas especies como ruta de tránsito, sitio de descanso y para la provisión de alimento y agua en su desplazamiento hacia los sitios habituales de residencia. Bien lo señalan Gómez, et al., (2013), los bosques naturales son una “alternativa que ofrece refugio y alimento a la fauna silvestre residente y migratoria”.

Otra especie presente en el bosque El Colmón, que cumple un rol fundamental para los ecosistemas, es el gallinazo negro (*Coragyps atratus*) y el gallinazo cabecirrojo (*Cathartes aura*), grupo que se alimentan de carroña (Ridgely & Gwynne, 2005). Estos autores señalan que *Coragyps atratus* desempeña un papel útil como “basurero suplementario”.

Los gallinazos, las aves de rapiña como el gavián común y el halcón peregrino y depredadores como el coyote, yaguarundi e insectos como los odonatos, entre otros organismos, participan en el control biológico del ecosistema de EL Colmón. Abouhamad et al., (2016), señalan que el control biológico consiste entonces en la “utilización de organismos vivos (parasitoides, depredadores o patógenos) para reducir y mantener la abundancia poblacional de una especie (animales o plantas) por debajo de los niveles de daño económico”.

Durante los recorridos por el bosque, también se logró registrar parte de la flora que, junto con la fauna señalada anteriormente y gran variedad de hongos, muestran parte de la macro biodiversidad existente en el bosque comunal El Colmón.

Para el caso de la flora registrada, fueron 24 diferentes especímenes distribuidos en 15 familias, siendo la familia Fabaceae la predominante con 16,7 % de los registros, seguida por la familia Orquideaceae con 12,5 % y las familias Malvaceae, Lamiaceae y Bromeliaceae con 8,3 %, respectivamente. El 45,9 % restante de las plantas observadas lo integran las familias: Bignoniaceae, Burseraceae, Meliaceae, Polygonaceae, Rubiaceae, Anacardiaceae, Mimosaceae, Combretaceae, Cactaceae, Selaginellaceae y Sphagnaceae. Estos hallazgos coinciden con la investigación realizada por Gómez, et.al (2013), en el bosque remanente caducifolio del Centro

Universitario de Los Santos y en el bosque seco tropical de Río Hato, donde la familia Fabaceae es una de las predominantes (López et al.,2015).

En el Colmón, bosque seco tropical (López et al., 2015), se encontró la vegetación distribuida de una forma particular, ya que en el borde frontal y posterior del bosque predomina la vegetación de follaje perenne; en tanto que, en la parte central predomina la vegetación de follaje caducifolio. Esta condición de bosque heterogéneo, (Mendieta & Mitre, 2010), está presente también en el bosque seco tropical de Los Achotines, ambos ecosistemas localizados en la provincia de Los Santos.

Los bosques caducifolios responden adaptativamente a la carencia de agua dejando caer sus hojas para evitar la pérdida de esta (Mendieta & Mitre, 2010); hecho observado en la vegetación de follaje caducifolio presente en el bosque El Colmón durante los meses de febrero hasta principios de mayo. Esa vegetación recuperó su follaje después de este tiempo, coincidiendo con el inicio de la temporada lluviosa que se extiende de mayo a noviembre; observándose así nuevamente una vegetación con follaje uniforme. (Espinosa et al.,2011), mencionado por Huechacona, (2016).

Esta característica particular de los bosques caducifolios, de perder sus hojas durante el verano, contribuye a la disponibilidad de nutrientes, ya que “por medio de la hojarasca se regenera el suelo, se evita la erosión, se mejoran las propiedades físicas y químicas del suelo, y se mantiene la fertilidad de este, además que ayuda a sostener la vida de la fauna heterótrofa” (Hernández et al., 2013).

Otro punto importante es el papel que juegan los bosques en la mitigación de las inundaciones y la erosión del suelo en la temporada lluviosa (Pramova et al., 2012), servicios estos que encontramos en el área de estudio y que se evidencia con el inicio de las lluvias; pues, luego de una fuerte precipitación se aprecia sedimentación, ramas caídas o arrastradas por el cauce de las quebradas y desechos sólidos procedentes del vertedero a cielo abierto quedan retenidos entre las raíces de los árboles y lianas presentes a lo largo de esas quebradas.

De igual forma, se puede señalar que, debido a su composición arbórea, el bosque El Colmón contribuye al mantenimiento de las condiciones climáticas, fijan CO₂ almacenada en la biomasa y evita el efecto de invernadero como bien lo manifiestan Escudero & Scheelje (2003), de esta manera el Colmón juega un papel vital en el mantenimiento de las condiciones climáticas de la región.

Entre los especímenes de flora registrados 20,8 % son apreciados por su madera, entre ellos: *Dalbergia retusa*, *Cedrela tonduzii*, *Peltogyne purpurea* Pittier, *Tectona grandis*, *Calycophyllum candidissimum* y 12,5 % representado por especies de orquídeas, que son apreciadas por su atractivo floral: *Encyclia cordigera*, *Guarianthe patinii* y *Brassavola nodosa* (Silvera, 2010); lo que podría representar un peligro para la conservación de la flora y fauna del lugar, ya que se registró, a través de fotos y videos obtenidos con las cámaras trampa, la incursión de personas y animales domésticos al bosque; lo que riñe con la normativa y dinámica del área protegida.

Con respecto a la presencia y considerable abundancia de varias especies de orquídeas en el área de estudio, además de bromelias, cactus, musgos y selaginella, es importante resaltar que son bioindicadores del buen estado de conservación del bosque, ya que son muy sensibles a la calidad del ambiente en que se encuentran y suelen ser las primeras en desaparecer cuando el ambiente se deteriora según Thorsten et al., 2014. Esta aseveración es un indicativo del buen estado de conservación del bosque El Colmón.

Además, existe una alta población de piñuela (*Bromelia pingüi*) la cual, según Mondragón et al., (2011), representa una fuente de alimento para pequeños animales por los frutos y es fuente de almacenamiento de agua; pues, por la disposición de sus hojas, en forma de rosetas, forman un tanque para el almacenamiento de agua que le permite acopiar nutrientes y albergar muchas especies de invertebrados y pequeños anfibios.

Sobre la disponibilidad del agua en El Colmón, se apreció la presencia de diversos canales donde convergen las aguas de la temporada lluviosa y que, aún en temporada seca, disponen de pozos y charcas de agua en los que confluyen diversidad de aves, insectos, reptiles, anfibios y mamíferos, entre ellos, el Yaguaroundi y el Coyote, que la ingieren o la utilizan directamente para refrescarse tal y como se observó en las imágenes y vídeos capturados con las cámaras trampa.

De acuerdo con los resultados de la encuesta representativa tenemos que la ocupación de los encuestados fue diversa, esto permitió obtener respuestas desde diferentes perspectivas de la población, siendo los jóvenes en formación académica el porcentaje más alto registrado con 36,7%.

Entre otras respuestas a la encuesta, observamos:

Figura 2.

¿Sabes de la existencia del bosque comunal El Colmón de Macaracas?



Se observó que el 92 % de los encuestados manifiestan saber de la existencia del bosque El Colmón. Recordemos, que la población vive en la zona aledaña al mismo, además, está las instalaciones de Mi Ambiente en el área que continuamente lo recorren.

Figura 3.

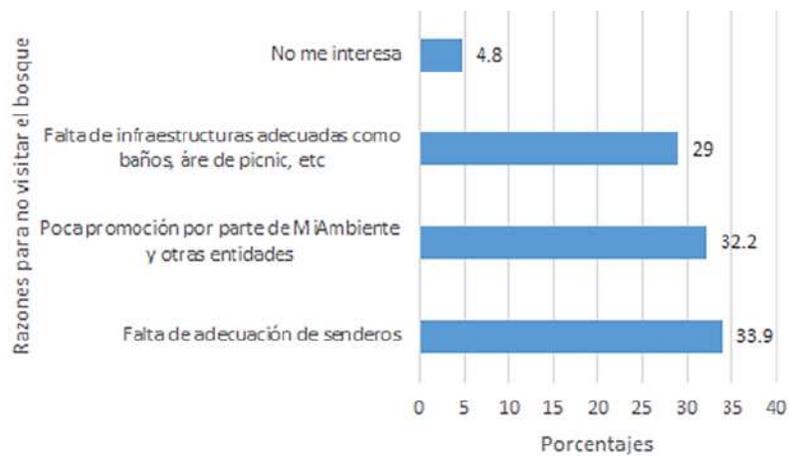
Aspectos que llamaron la atención a las personas que han visitado el bosque El Colmón.



Como se apreció en la figura 3; al 40,5 % de los encuestados lo que más le llamó la atención en su visita al bosque fue la biodiversidad del lugar. Estos datos refuerzan, según mi Ambiente, el aumento de visitas tanto de nacionales como de extranjeros a nuestras áreas protegida, atraídos por la riqueza en biodiversidad (Gaceta oficial No 175, 2023).

Figura 4.

Razones por las cuales los encuestados no han visitado el Bosque El Colmón



En la figura 4 se mostró que 33,9 % no han visitado el bosque por la falta de adecuación de senderos, situación preocupante, ya que la falta de senderos con señalizaciones adecuadas, bien implementadas impide que más visitantes recorran nuestros bosques (Gaceta oficial No 175, 2023).

Figura 5.

Beneficios que los encuestados reconocen recibir del bosque El Colmón.



Los encuestados manifiestan que los beneficios que obtienen del bosque el Colmón son recreación y ecoturismo (29%), vertedero de desechos municipales (27%), belleza escénica (18%), fuente de abastecimiento de materias primas (leña, alimento, agua, plantas medicinales 16%), fuente maderera (8%) (Figura 6). Estos resultados y el hecho de que la población considera un beneficio poder “depositar” su basura en un vertedero a cielo abierto ubicado en el bosque, nos llevan a señalar que la población desconoce en general los SE que ofrece el Colmón, presentan bajo aprovechamiento de estos y no relacionan los bosques con otros beneficios como la regulación de los ciclos naturales o protección del suelo u otros SE (Domínguez, 2018).

Claramente se muestra en la figura 6, que el 50% de los encuestados advierte que el mayor peligro que enfrenta El Colmón es el vertedero, seguido por la contaminación que se refleja en un 6,8%; claro está como, consecuencia del primero. Un estudio semejante realizado en la comunidad de Chepo, ubicado en el distrito de Chepo, provincia de Panamá, demuestra que el inadecuado manejo de la basura de un vertedero a cielo abierto es un peligro para la comunidad, Además, los daños causados, al ecosistema pueden afectar en la generación de los beneficios, agregando costos sobre la sociedad que depende de ellos (Sánchez et al., 2019).

Figura 6.

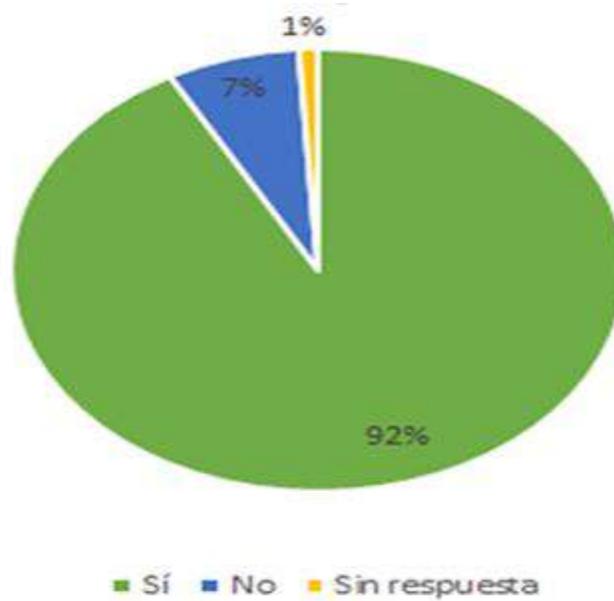
Principales peligros que enfrenta El Colmón, según los encuestados



Como puede observarse en la figura 7, se reflejó que el 92 % se siente orgulloso de que esta área protegida pertenezca al distrito de Macaracas.

Figura 7.

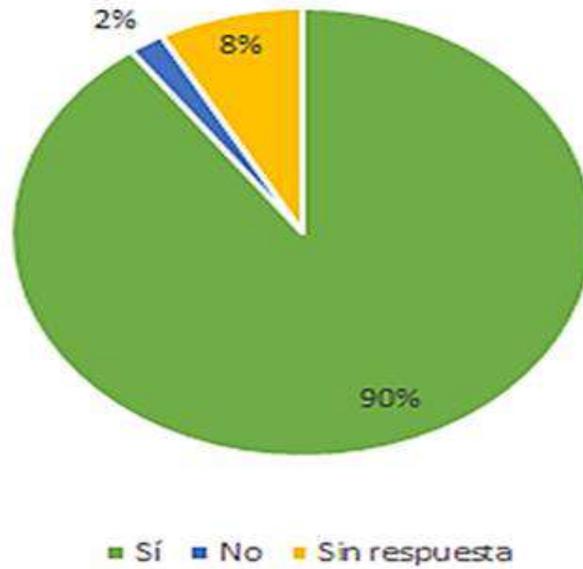
Como morador del distrito de Macaracas, ¿usted siente orgullo de que el bosque El Colmón se encuentre en esta región?



Finalmente, en la figura 8, se mostró que el 90 % de los encuestados considera importante y necesario realizar actividades de conservación en esta área protegida. Igual resultado se encontró en la investigación realizada en la Reserva Forestal El Montuoso, donde la población reconoce la importancia de conservar las áreas protegidas (Garibaldi y Arcia, 2016).

Figura 8.

¿Considera importante y necesario realizar actividades de conservación en esta área protegida?



A continuación, en la tabla 1, presentamos los resultados correspondientes a la identificación y evaluación de los SE.

Tabla 1.*Servicios ecosistémicos identificados en el bosque comunal El Colmón*

Tipos de Servicios Ecosistémicos	Beneficios
SE de abastecimiento o Aproveccionamiento (7)	Fuente de energía
	Materias primas para construcción de viviendas
	Bienestar económico
	Materias primas
	Madera
	Extractos naturales de uso medicinal
	Recursos genéticos
SE de regulación y soporte (8)	Control de inundaciones
	Disponibilidad del agua
	Calidad del aire
	Control Biológico
	Mantenimiento de la Biodiversidad
	Regulación de la erosión
	Disponibilidad de nutrientes
	Mantenimiento de las condiciones climáticas
S.E. socioculturales (4)	Belleza escénica
	Recreación y ecoturismo
	Importancia espiritual
	Importancia e identidad cultural

Con base en la información recabada, se estimó el nivel de importancia de los SE de regulación y soporte y socioculturales utilizando la matriz de evaluación descrita en los materiales y métodos. (Tabla 2)

Tabla 2.

Evaluación del nivel de importancia de los SE que ofrece el bosque comunal El Colmón de Macaracas.

Servicios Ecosistémicos	Criterios					I	Nivel de importancia
	CO	OF	PEM	PER	NS		
Control de inundaciones	5	10	10	10	10	4 5	Importante
Disponibilidad del agua	10	10	10	10	10	5 0	Muy importante
Calidad del aire	10	10	10	10	10	5 0	Muy importante
Control Biológico	5	10	10	10	10	4 5	Importante
Mantenimiento de la Biodiversidad	10	10	10	10	10	5 0	Muy importante
Regulación de la erosión	5	10	10	10	10	4 5	Importante
Disponibilidad de nutrientes	5	10	10	10	10	4 5	Importante
Mantenimiento de las condiciones Climáticas	10	10	10	10	10	5 0	Muy importante
Belleza escénica	5	10	10	10	10	4 5	Importante
Recreación y ecoturismo	5	5	10	10	5	3 5	Importante
Importancia espiritual	1	5	5	5	5	2 1	Moderada
Importancia e identidad cultural	5	10	10	10	10	4 5	Importante

Como se observó en la Tabla 1, se encontraron, además 7 servicios ecosistémicos de abastecimiento o aprovisionamiento (fuente de energía, materias primas para construcción de viviendas, bienestar económico, materia prima, madera, extractos naturales de uso medicinal y recursos genéticos), pero no los incluimos para su evaluación dado que, por tratarse de un área protegida, según Ley No. 27, de 27 de diciembre de 1918, Gaceta Oficial No 3021 del 20 de enero de 1919, no pueden ser utilizados. Sin embargo, cabe señalar que, a pesar de las disposiciones de esta ley, dentro de los linderos de El Colmón, se ubica el vertedero municipal de Macaracas. Este es un vertedero a cielo abierto donde se deposita todo tipo de basura, incluyendo los desechos hospitalarios; lo que puede ocasionar afectaciones al ambiente en general (Castro, 2010).

Se observó que el segundo grupo de SE son aquellos beneficios materiales que las personas obtienen de los ecosistemas y, además, son necesarios para la producción de todos los demás SE; en cambio, los cuatro últimos SE son beneficios intangibles; como: la fuente de inspiración para las manifestaciones estéticas, la identidad cultural y el bienestar espiritual y recreativo. Estos resultados dejan ver claramente, que los SE de regulación y soporte presentan los más altos niveles de importancia, indicando que este bosque conserva equilibrio ecológico. En cambio, los niveles de importancia de los SE Socioculturales muestran que la población considera que, para resaltar la importancia de estos servicios, aún se requiere de mayor apoyo por parte de las instituciones gubernamentales.

CONCLUSIONES

Nuestra investigación en el bosque comunal El Colmón presentó una diversidad de SE que, hasta el momento, la comunidad científica, educativa y la general desconocían. Se identificaron 19 SE, de los cuales 12 pueden ser aprovechados por la comunidad y 7 no pueden utilizarse, pues se trata de un área protegida que se ampara bajo la normativa que lo prohíbe. (Tabla 1), En cuanto a la cantidad y nivel de importancia de los SE encontrados en El Colmón (Tabla 1), marca la importancia de esta área protegida para la región, tanto por el beneficio ecológico como el beneficio social que provee. Además, presenta buen estado de conservación de este (Tabla 1).

La encuesta comunitaria a una muestra representativa de sesenta personas residentes en áreas cercanas al bosque manifiesta que el vertedero a cielo abierto representa una afectación directa para el bosque El Colmón y ven como apremiante e inaplazable, la necesidad de su reubicación.

Es necesario aplicar planes de conservación, que incluyan el aprovechamiento y la adecuada gestión ambiental de este Bosque seco tropical, llevados de la mano por

entidades establecidas para este fin, ya que se cuenta con la línea base que hemos aportado como científicos comprometidos, en la protección del bosque, para así asegurar la sostenibilidad de las presentes y futuras generaciones.

AGRADECIMIENTO

Un sincero agradecimiento a Dios y a nuestras familias, impulsores constantes en el logro de las metas propuestas y aliciente motivador, para superar los retos surgidos a lo largo de la realización de este proyecto de investigación.

Al personal de MiAmbiente, en especial a Noriel Batista y Alexis Pérez, facilitadores logísticos, y a los guardaparques de El Colmón: Nelson Mendoza, Fidel Gutiérrez y José Manuel Cedeño por su acompañamiento durante los recorridos por el bosque. Al Dr. Mario Pineda por su apoyo en la validación de la encuesta aplicada y al Lic. Sergio Batista por la confección de los mapas requeridos.

El agradecimiento se extiende a todos aquellos que, directa o indirectamente, contribuyeron para que esta meta fuera concretada.

A todos, muchas gracias.

REFERENCIAS

Abouhamad, S., Rojas, M., Ramírez, L., Céspedes, K. & Salmerón A. (2016). Servicios ecosistémicos de regulación que benefician a la sociedad y su relación con la restauración ecológica. <file:///C:/Users/lourd/Downloads/1731-Texto%20del%20art%C3%ADculo-4463-1-10-20170330.pdf>

Castañeda, A. C. (2013). Diseño de una metodología para evaluar el estado de los servicios ecosistémicos. Universidad Militar Nueva Granada. <https://repository.unimilitar.edu.co/bitstream/handle/10654/10960/Dise%F1o%20de%20una%20metodolog%EDa%20para%20evaluar%20el%20estado%20de%20los%20Servicios%20Ecosist%E9micos.pdf;jsessionid=F499F2D55185413EE761A301D64F6C99?sequence=2>

Castro, A. (2010). Propuesta de ordenamiento territorial para el distrito de Macaracas, Provincia de Los Santos. http://up-rid.up.ac.pa/3459/1/ariel_castro.pdf

- CNC Panamá. (2011). Competitividad al día: Valoración económica de las áreas protegidas. Edición No.53. <file:///C:/Users/lourd/Downloads/Competitividad%20al%20Dia%20No.%20053%20-%20Valoracion%20Economica%20de%20las%20Areas%20Protegidas.pdf>
- Domínguez, Y. (2018). Importancia de la cobertura arbórea para la provisión de servicios ecosistémicos en fincas ganaderas de doble propósito en la Cuenca del Río La Villa, Panamá. CATIE <http://repositorio.bibliotecaorton.catie.ac.cr/handle/11554/8974>
- eBird. (2018 y 2020). “El Común de Macaracas”. eBird Basic Dataset. Cornell Lab of Ornithology, Ithaca, New York. <https://ebird.org/hotspot/L3350940>
- Escudero, M. & Scheelje, J. (2003). Rol de los Bosques en el Cambio Climático. <https://www.fao.org/3/xii/0814-b2.htm>
- Evaluación de los Ecosistemas del Milenio, MEA. (2005). <https://www.millenniumassessment.org/documents/document.439.aspx.pdf>
- Gaceta Oficial No. 28 679. Ley 128 de 2018. Estrategia y Plan de Acción Nacional de Biodiversidad. https://www.gacetaoficial.gob.pa/pdfTemp/28681_C/GacetaNo_2868_1c_20181221.pdf
- Gaceta Oficial No. 3021. Ley 27 de 27 de diciembre de 1918. Por la cual se declaran inadjudicables en propiedad unas tierras nacionales. <https://docs.panama.justia.com/federales/leyes/27-de-1918-jan-20-1919.pdf>
- Gaceta Oficial No. 23578. Ley 41 de 1 de julio de 1998. General de Ambiente de la República de Panamá. http://www.oas.org/juridico/spanish/pan_res67.pdf
- Garibaldi, C. & Arcia, G. (2016). Bienes y servicios ecosistémicos y su percepción social en la Reserva Forestal El Montuoso. *Tecnociencia*. 18(2) <http://up-rid.up.ac.pa/112/>
- Gómez, J., Martínez, V., Araúz, J., Cambra, R., Carrasquilla, L., Mendieta, J., & Rodríguez, E. (2013). Estudio de recursos biológicos y lineamientos estratégicos para el plan de manejo del Refugio Ecológico Universitario de Los

- Santos, ciudad de Las Tablas. *Visión Antataura*. 1(2013). <file:///C:/Users/lourd/Downloads/207-Texto%20del%20art%20C3%ADculo-336-1-10-20181010.pdf>
- Hernández, J., González, H., Gonzalo, R., Cantú, I., Gómez, M., Pando, M. & Estrada, A. (2013). Producción de hojarasca y retorno potencial de nutrientes en tres sitios del estado de Nuevo León, México. *Scielo*. 35(1) http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-27682013000100003
- Huechacona, A. (2016). Dinámica de la producción de hojarasca y el índice de área foliar en un bosque tropical seco en Yucatán. https://cicy.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1003/419/1/PCB_M_Tesis_2016_Astrid_Huechacona.pdf
- López, O., Pérez, R. & Mariscal, E. (2015). Diversidad de árboles y arbustos en fragmentos de bosque seco tropical en río Hato, Panamá. *Colombia Forestal*. 18(1) <https://revistas.udistrital.edu.co/index.php/colfor/article/view/7667>
- Mendieta, J. & Mitre, D. (2010). Estructura horizontal del Bosque Caducifolio observada en una parcela al sur de la Península de Azuero. *Tecnociencia*. 12(2). https://nanopdf.com/download/mendieta-j-y-mitre-d-estructura-horizontalde-bosque_pdf.
- Mondragón, D., Ramírez, I Cruz, M. & García, J. (2011). La Familia Bromeliaceae en México. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/225103/La_familia_bromeliaceae_en_mexico-pdf
- Pabon, L., Bezaury, J., Leon, F., Gil. L., Stolton, S., Grove, A., Mitchell, S. & Dudley, N. (2008). Valorando la Naturaleza: Beneficios de las áreas protegidas. <file:///C:/Users/lourd/Downloads/2008ValorandolanaturalezaPabonetal.pdf>
- Posadas, C. (2017). Coyote *Canis latrans*, su hábitat y comportamiento. *Universitario Potosinos*13(209) file:///C:/Users/lourd/Downloads/UniversitariosPotosinos209_COYOTE.pdf

- Pramova, E., Locatelli, B., Djoudi, H. & Somorin, O. (2012). Bosques y árboles para la adaptación social al cambio y la variabilidad del clima.
Pramova2012BosquesyarbolesparaadaptacionsocialalCC (1).pdf
- Ridgely, R. & Gwynne, J. (2005). Guía de las aves de Panamá: ANCON.
- Satalier, D. (2017). Felinos de Argentina, Yaguarundí.
<https://felinosdeargentina.com.ar/los-felinos/yaguarundi/>
- Sánchez, M. E., Smith, R., & Jones Burkett, V. (2019). Impacto del vertedero a cielo abierto en habitantes de la comunidad de Chepo, Higuera 2018. *Centros: Revista Científica Universitaria*, 8(2),95–104.
<https://revistas.up.ac.pa/index.php/centros/article/view/735>
- Thorsten K., García, J. & Toledo, T. (2014). Epífitas vasculares como bioindicadores de la calidad forestal: impacto antrópico sobre su diversidad y composición.
https://www.researchgate.net/publication/271517337_Epifitas_vasculares_como_bioindicadores_de_la_calidad_forestal_im_pacto_antropico_sobre_su_diversi_dad_y_composicion



FUNCIONES CONTINUAS Y NO DIFERENCIABLES EN TODO PUNTO

CONTINUOUS NOWHERE DIFFERENTIABLE FUNCTIONS

Eric Hidalgo G.

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

eric.hidalgo@up.ac.pa

<https://orcid.org/0009-0001-4523-4439>

Ángela J. Franco.

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

angela.franco@up.ac.pa

<https://orcid.org/0000-0002-7085-6870>

Fecha de recepción: 20 de junio de 2023

Fecha de aceptación: 2 de noviembre de 2023

DOI <https://doi.org/10.48204/j.tecno.v26n1.a4666>

RESUMEN

Desde los cursos de cálculo diferencial se sabe que una función continua no necesita ser diferenciable; sin embargo, se tiene la idea errónea que una función continua tiene que ser diferenciable en muchos puntos. Con la idea de corregir este error, en el presente artículo se construye un ejemplo de una función $f: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ que es continua y no diferenciable en todo punto x de \mathbb{R} . También se prueba que el conjunto de puntos de continuidad de la derivada de una función diferenciable es enumerable. Además, se presenta un ejemplo de una función diferenciable cuyo conjunto de discontinuidad de la derivada es denso.

PALABRAS CLAVES

Convergencia puntual, convergencia uniforme, conjunto de continuidad, no diferenciable en todo punto, conjunto denso.

ABSTRACT

From differential calculus courses it is known that a continuous function need not be differentiable; however, there is a mistaken idea that a continuous function must be differentiable at many points. With the idea of correcting this misconception, in this paper an example of a function $f: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ that is continuous and nowhere differentiable in \mathbb{R} is constructed. It is also proved that the set of point where the derivate of a differentiable function is continuous is enumerable. Furthermore, an example of a differentiable function whose set of discontinuity of the derivate is dense.

KEY WORDS

Pointwise convergence, uniform convergence, set of continuity, nowhere diffentiable, dense set.

INTRODUCCIÓN

Después del descubrimiento del cálculo diferencial e integral por Isaac Newton (1642-1727) y Gottfried Wilhelm Leibniz (1646-1716), los matemáticos de la época comúnmente creían que las funciones continuas poseían derivada en una cantidad significativa de puntos. Esta creencia fue fortalecida por una “demostración” de este hecho presentada por el físico matemático francés André - Marie Ampère (1775-1836), en su artículo de 1806 titulado “Recherches sur quelques points de la théorie des fonctions dérivées qui corduisenta une nouvelle demonstration de la serie de Taylor”. En una demostración típica de su época, el argumento de Ampere no fue escrito en una forma rigurosa como se exige hoy en día. (Dunham, 2018; Edward, 1994).

Probablemente el primer ejemplo de una función continua y no diferenciable en todo punto de un intervalo fue presentado por el matemático checo Bernard Bolzano (1781-1848) alrededor de los años 1830, pero no fue publicado hasta un siglo después.

En 1872 el matemático alemán Karl Weierstrass (1815-1897) presentó a la academia de ciencias de Berlín un ejemplo de una función continua que no es diferenciable en todo punto de \mathbb{R} , el cual tuvo un gran impacto en el crecimiento del rigor de las demostraciones matemáticas, introducido a finales del siglo XIX y en el siglo XX. Estos tipos de funciones fueron bautizadas con el nombre de monstruos de Weierstrass (W-monstruo) por el matemático francés Henri Poincaré (1854-1912). (Ciesielski, 2022; Ciesielski, 2018; Jarnicki, 2015).

Motivado por el impacto que han tenido este tipo de funciones (W-monstruos) en la matemática, en este artículo se construye una función continua y no diferenciable en todo punto de \mathbb{R} . Por otro lado, se prueba que el conjunto de continuidades de la derivada de una función diferenciable es denso y no enumerable, a pesar de que el conjunto de discontinuidades también puede ser denso.

PRELIMINARES

En esta sección se presentan algunas definiciones y conceptos que aparecen en el desarrollo del artículo; sin embargo, para evitar que la discusión sea muy larga, sólo se presentarán los conceptos más trascendentes para la comprensión y desarrollo de los temas expuestos. (Folland, 2007; Gordon, 2001).

Definición 1: Sea $\{f_n\}_{n=1}^{\infty}$ una sucesión de funciones definidas en un intervalo $I \subset \mathbb{R}$ y sea $f : I \rightarrow \mathbb{R}$ una función. La sucesión $\{f_n\}_{n=1}^{\infty}$ converge puntualmente a la función f en I si la sucesión $\{f_n(x)\}_{n=1}^{\infty}$ converge a $f(x)$ para todo $x \in I$. Es decir, $f(x) = \lim_{n \rightarrow \infty} f_n(x)$ para todo $x \in I$.

La convergencia es uniforme si, para todo $\varepsilon > 0$ existe un número entero positivo N tal que para todo $x \in I$

$$|f_n(x) - f(x)| < \varepsilon, \text{ siempre que } n \geq N$$

Es decir, si

$$\limsup_{n \rightarrow \infty} \sup_{x \in I} |f_n(x) - f(x)| = 0$$

Definición 2: Sea $\{f_n\}_{n=1}^{\infty}$ una sucesión de funciones definidas en un intervalo $I \subset \mathbb{R}$ y sea $f : I \rightarrow \mathbb{R}$ una función. La serie $\sum_{n=1}^{\infty} f_n$ converge puntualmente (uniformemente) a f en I si la correspondiente sucesión de sumas parciales $\{S_n\}_{n=1}^{\infty} = \left\{ \sum_{k=1}^n f_k \right\}$ converge puntualmente (uniformemente) a f en I .

Teorema 1 (M-test de Weierstrass): Sea $\{f_n\}_{n=1}^{\infty}$ una sucesión de funciones definidas en un intervalo I de \mathbb{R} y suponga que $|f_n(x)| \leq M_n$ para todo $x \in I$. Si la serie numérica $\sum_{n=1}^{\infty} M_n$ converge, entonces la serie $\sum_{n=1}^{\infty} f_n$ converge uniformemente en I .

Teorema 2 (Convergencia uniforme y continuidad): Sea $\{f_n\}_{n=1}^{\infty}$ una sucesión de funciones continuas definidas en un intervalo I en \mathbb{R} y sea $f: I \rightarrow \mathbb{R}$ una función.

- a) Si la sucesión $\{f_n\}_{n=1}^{\infty}$ converge uniformemente a f en I , entonces f es continua en I .
- b) Si la serie $\sum_{n=1}^{\infty} f_n$ converge uniformemente a f en I , entonces f es continua.

Teorema 3: Sea $\{f_n\}_{n=1}^{\infty}$ una sucesión de funciones continuas en un intervalo I de \mathbb{R} y sea $f: I \rightarrow \mathbb{R}$ una función. Si la sucesión $\{f_n\}_{n=1}^{\infty}$ converge puntualmente a f en I , entonces el conjunto $C_f = \{x \in I : f \text{ es continua en } x\}$ es denso en I .

DIFERENCIABILIDAD DE FUNCIONES CONTINUAS

Los estudiantes que han completado los cursos de cálculo diferencial e integral al igual que los matemáticos del siglo XIII no están conscientes del hecho contraintuitivo que, una función continua puede ser no diferenciable en todo punto $x \in \mathbb{R}$. En esta sección se construye una función continua y no diferenciable en todo punto $x \in \mathbb{R}$.

En efecto, sean a, b números reales positivos. Para cada número entero no negativo n defina la función $f_n: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ por

$$f_n(x) = a^n \cos(b^n \pi x)$$

Note que f_n es continua en \mathbb{R} y

$$|f_n(x)| = |a^n \cos(b^n \pi x)| \leq a^n$$

Supongamos que $0 < a < 1$, entonces $\sum_{n=0}^{\infty} a^n = \frac{1}{1-a} < 1$. Luego, por el

M-test de Weierstrass, la serie de funciones $\sum_{n=0}^{\infty} f_n(x)$ converge uniformemente a una función $W(x)$ en \square , o sea

$$W(x) = \sum_{n=0}^{\infty} a^n \cos(b^n \pi x)$$

Por otro lado, como las funciones f_n son continuas, por el teorema de convergencia uniforme y continuidad, W es continua en \square . Denote

$$W_n(x) = \sum_{j=0}^n a^j \cos(b^j \pi x)$$

entonces la sucesión de funciones $\{W_n\}_{n=0}^{\infty}$ converge uniformemente a W y cada función W_n es diferenciable en \square .

¿Qué se puede decir sobre la diferenciability de la función W ?

Sea x_0 un punto arbitrario pero fijo de \square . Para cada número entero positivo m existe un número entero β_m tal que

$$\left[\frac{1}{2} + b^m x_0, \frac{3}{2} + b^m x_0 \right) \cap \square = \{\beta_m\}$$

Luego,

$$\frac{1}{2} + b^m x_0 \leq \beta_m < \frac{3}{2} + b^m x_0, \quad \beta_m \in \square$$

$$\frac{1}{2} \leq \beta_m - b^m x_0 < \frac{3}{2}$$

$$\frac{1}{2b^m} \leq \frac{\beta_m}{b^m} - x_0 < \frac{3}{2b^m}$$

de donde

$$\frac{\beta_m}{b^m} - \frac{3}{2b^m} < x_0 \quad \text{y} \quad x_0 \leq \frac{\beta_m}{b^m} - \frac{1}{2b^m}$$

o sea

$$x_0 \in \left(\frac{\beta_m}{b^m} - \frac{3}{2b^m}, \frac{\beta_m}{b^m} - \frac{1}{2b^m} \right] \quad , \quad \beta_m \in \square$$

Denote

$$\alpha_m = \frac{\beta_m}{b^m}$$

Suponga que $b > 1$, entonces

$$0 = \lim_{m \rightarrow \infty} \left(\frac{1}{2b^m} \right) \leq \lim_{m \rightarrow \infty} (\alpha_m - x_0) \leq \lim_{m \rightarrow \infty} \left(\frac{3}{2b^m} \right) = 0$$

de donde

$$\lim_{m \rightarrow \infty} \alpha_m = x_0$$

Suponga que W es diferenciable en x_0 , entonces

$$\lim_{m \rightarrow \infty} \frac{W(\alpha_m) - W(x_0)}{\alpha_m - x_0} = W'(x_0)$$

Considere el límite

$$\lim_{m \rightarrow \infty} (-1)^{\beta_m} \left[\frac{W(\alpha_m) - W(x_0)}{\alpha_m - x_0} \right]$$

Note que

$$\begin{aligned}
(-1)^{\beta_m} \left[\frac{W(\alpha_m) - W(x_0)}{\alpha_m - x_0} \right] &= (-1)^{\beta_m} \left[\frac{\sum_{n=0}^{\infty} a^n \cos(b^n \pi \alpha_m) - \sum_{n=0}^{\infty} a^n \cos(b^n \pi x_0)}{\alpha_m - x_0} \right] \\
&= \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^{\beta_m} a^n \left(\frac{\cos(b^n \pi \alpha_m) - \cos(b^n \pi x_0)}{\alpha_m - x_0} \right) \\
&= \sum_{n=0}^{m-1} (-1)^{\beta_m} a^n \left(\frac{\cos(b^n \pi \alpha_m) - \cos(b^n \pi x_0)}{\alpha_m - x_0} \right) + \\
&\quad \sum_{n=m}^{\infty} (-1)^{\beta_m} a^n \left(\frac{\cos(b^n \pi \alpha_m) - \cos(b^n \pi x_0)}{\alpha_m - x_0} \right) \\
&= F_m + G_m
\end{aligned}$$

Para F_m se tiene que

$$\begin{aligned}
F_m &= \sum_{n=0}^{m-1} (-1)^{\beta_m} a^n \left(\frac{\cos(b^n \pi \alpha_m) + \cos(b^n \pi x_0)}{\alpha_m - x_0} \right) \\
&= \sum_{n=0}^{m-1} (-1)^{\beta_m} (ab)^n \pi \left(\frac{\cos(b^n \pi \alpha_n) - \cos(b^n \pi x_0)}{b^n \pi \alpha_n - b^n \pi x_0} \right)
\end{aligned}$$

Luego, por el teorema del valor medio, existe un $c_{m,n} \in \square$ tal que

$$F_m = \sum_{n=0}^{m-1} (-1)^{\beta_m} (ab)^n \pi (-\text{sen } c_{m,n})$$

Por lo tanto,

$$\begin{aligned}
|F_m| &= \left| \sum_{n=0}^{m-1} (-1)^{\beta_m} (ab)^n \pi (-\text{sen } c_{m,n}) \right| \\
&\leq \sum_{n=0}^{m-1} (ab)^n \pi \\
&= \pi \left[\frac{(ab)^m - 1}{ab - 1} \right] \\
&= (ab)^m \left(\frac{\pi}{ab - 1} \right) - \pi \left(\frac{1}{ab - 1} \right)
\end{aligned}$$

Suponga que $ab > 1$, entonces

$$|F_m| \leq (ab)^m \left(\frac{\pi}{ab-1} \right)$$

Para G_m se tiene que $n \geq m$, además

$$\begin{aligned} G_m &= \sum_{n=m}^{\infty} (-1)^{\beta_m} a^n \left(\frac{\cos(b^n \pi \alpha_m) - \cos(b^n \pi x_0)}{\alpha_m - x_0} \right) \\ &= \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^{\beta_m} a^{m+n} \left(\frac{\cos(b^{m+n} \pi \alpha_m) - \cos(b^{m+n} \pi x_0)}{\alpha_m - x_0} \right) \end{aligned}$$

Suponga que b es un número entero impar ($b > 1$), entonces como β_m es un número entero, se tiene que

$$\begin{aligned} \cos(b^{m+n} \pi \alpha_m) &= \cos\left(\frac{b^{m+n} \pi \beta_m}{b^m} \right) \\ &= \cos(b^n \pi \beta_m) \\ &= \begin{cases} -1, & \text{si } \beta_m \text{ es impar} \\ 1, & \text{si } \beta_m \text{ es par} \end{cases} \\ &= (-1)^{\beta_m} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \cos(b^{m+n} \pi x_0) &= \cos(b^n \pi \beta_m - b^n \pi \beta_m + b^{m+n} \pi x_0) \\ &= \cos(b^n \pi \beta_m - b^n \pi (b^m x_0 - \beta_m)) \\ &= \cos(b^n \pi \beta_m) \cos(b^n \pi (b^m x_0 - \beta_m)) + \\ &\quad \text{sen}(b^n \pi \beta_m) \text{sen}(b^n \pi (b^m x_0 - \beta_m)) \\ &= (-1)^{\beta_m} \cos(b^n \pi (b^m x_0 - \beta_m)) \end{aligned}$$

Por lo tanto,

$$(-1)^{\beta_m} \cos(b^{m+n} \pi \alpha_m) = (-1)^{\beta_m} (-1)^{\beta_m} = 1$$

y

$$(-1)^{\beta_m} \cos(b^{m+n} \pi x_0) = \cos(b^n \pi (b^m x_0 - \beta_m))$$

Esto implica que

$$\begin{aligned} G_m &= \sum_{n=0}^{\infty} a^{m+n} \left(\frac{1 - \cos(b^n \pi (b^m x_0 - \beta_m))}{\alpha_m - x_0} \right) \\ &= \frac{a^m (1 - \cos((b^m x_0 - \beta_m) \pi))}{\frac{\beta_m}{b^m} - x_0} + \sum_{n=1}^{\infty} a^{m+n} \left(\frac{1 - \cos(b^m x_0 - \beta_m) \pi}{\frac{\beta_m}{b^m} - x_0} \right) \end{aligned}$$

Como $\beta_m - b^m x_0 \in \left[\frac{1}{2}, \frac{3}{2} \right)$, se tiene

$$\cos((b^m x_0 - \beta_m) \pi) \leq 0 \quad \text{y} \quad \frac{\beta_m}{b^m} - x_0 > 0.$$

Por consiguiente,

$$\begin{aligned} G_m &\geq \frac{a^m (1-0)}{\frac{\beta_m}{b^m} - x_0} + \sum_{n=1}^{\infty} a^{m+n} \left(\frac{0}{\frac{\beta_m}{b^m} - x_0} \right) \\ &= a^m \left(\frac{1}{\frac{\beta_m}{b^m} - x_0} \right) \\ &= (ab)^m \left(\frac{1}{\beta_m - b^m x_0} \right) \\ &\geq (ab)^m \left(\frac{1}{\frac{3}{2}} \right) \\ &= \frac{2}{3} (ab)^m \end{aligned}$$

En conclusión, se tiene que

$$|F_m| \leq (ab)^m \left(\frac{\pi}{ab-1} \right) \quad \text{y} \quad G_n \geq \frac{2}{3}(ab)^m$$

De este resultado se concluye que

$$\begin{aligned} (-1)^{\beta_m} \left[\frac{W(\alpha_m) - W(x_0)}{\alpha_m - x_0} \right] &= F_m + G_m \\ &\geq G_m - |F_m| \\ &\geq \frac{2}{3}(ab)^m - (ab)^m \left(\frac{\pi}{ab-1} \right) \\ &= (ab)^m \left(\frac{2}{3} - \frac{\pi}{ab-1} \right) \end{aligned}$$

Suponga que

$$\frac{2}{3} - \frac{\pi}{ab-1} > 0$$

entonces $ab > \frac{3\pi+2}{2}$ y

$$\lim_{m \rightarrow \infty} (-1)^{\beta_m} \left[\frac{W(\alpha_m) - W(x_0)}{\alpha_m - x_0} \right] = \infty$$

Esto implica que

$$W'(x_0) = \lim_{m \rightarrow \infty} \frac{W(\alpha_m) - W(x_0)}{\alpha_m - x_0}$$

no existe para todo $x \in \square$. Así, la función W es no diferenciable en todo punto $x_0 \in \square$.

Los resultados obtenidos se resumen en el siguiente teorema debido a Weierstrass.

Teorema 4: Sean a y b números reales tales que $0 < a < 1$, b es un número entero impar positivo y $ab > \frac{3\pi + 2}{2}$. Entonces la función

$$W(x) = \sum_{n=0}^{\infty} a^n \cos(b^n \pi x)$$

es continua y no diferenciable en todo punto $x \in \mathbb{R}$.

La función $W(x)$ es llamada la función de Weierstrass (W -monstruo). El matemático británico Godfrey H. Hardy (1877-1945) generalizó el resultado de Weierstrass suponiendo solamente que $0 < a < 1$ y $ab \geq 1$ (no supone que b es un número entero). (Hardy, 1916; Jarnicki, 2015).

Teorema 5: Sean a y b números reales tales que $0 < a < 1$ y $ab \geq 1$ Entonces la función

$$W(x) = \sum_{n=0}^{\infty} a^n \cos(b^n \pi x)$$

es continua y no diferenciable en todo punto $x \in \mathbb{R}$.

Ejemplo 1: Sea b un número real, $b > 1$. Tome $a = b^{-1}$, entonces $0 < a < 1$ y $ab = 1$. Luego, por el Teorema 5, la función

$$W(x) = \sum_{n=0}^{\infty} a^n \cos(b^n \pi x) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{b^n} \cos(b^n \pi x)$$

es continua y no diferenciable en todo punto $x \in \mathbb{R}$. Por consiguiente, la función

$C(x) = W\left(\frac{x}{\pi}\right)$ es continua y no diferenciable en todo punto $x \in \mathbb{R}$.

Note que

$$C(x) = W\left(\frac{x}{\pi}\right) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{b^n} \cos(b^n x) \quad , \quad b > 1$$

En general, las funciones

$$C(x) = \sum_{n=0}^{\infty} a^n \cos(b^n x) \quad \text{y} \quad S(x) = \sum_{n=0}^{\infty} a^n \sin(b^n x)$$

donde $0 < a < 1$ y $ab \geq 1$ son continuas y no diferenciables en todo punto $x \in \mathbb{R}$.

CONTINUIDAD DE LA DERIVADA

En la sección anterior se presentó un ejemplo de una función continua y no diferenciable en todo punto $x \in \mathbb{R}$. Ahora la pregunta es ¿qué tan discontinua puede ser la derivada de una función diferenciable?; más precisamente, ¿existe una función diferenciable cuya derivada sea discontinua en todo punto de su dominio? La respuesta a esta pregunta se presenta en el siguiente teorema.

Teorema 6: Sea I un intervalo de \mathbb{R} y $f : I \rightarrow \mathbb{R}$ una función diferenciable en I . Entonces el conjunto

$$C_{f'} = \{x \in I : f' \text{ es continua en } x\}$$

es denso en I .

Demostración:

Para cada número entero positivo n defina la función $f_n : I \rightarrow \mathbb{R}$ por

$$f_n(x) = \frac{f\left(x + \frac{1}{n}\right) - f(x)}{\frac{1}{n}}$$

Como f es diferenciable en I , se tiene que f_n es continua en I . Note además que

$$\lim_{n \rightarrow \infty} f_n(x) = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{f\left(x + \frac{1}{n}\right) - f(x)}{\frac{1}{n}} = f'(x)$$

Por lo tanto, $\{f_n\}_{n=1}^{\infty}$ es una sucesión de funciones continuas que converge puntualmente a f' en I . Luego por el Teorema 3, el conjunto $C_{f'}$ es denso en I .

En el teorema anterior se probó que el conjunto de continuidades de la derivada de una función diferenciable es denso. En el siguiente ejemplo se construye una función diferenciable cuyo conjunto de discontinuidades de su derivada también es un conjunto denso.

Ejemplo 2: Sea $\{a_n\}_{n=1}^{\infty}$ una sucesión de números reales tal que el conjunto

$\{a_n : n \in \mathbb{N}\}$ es denso en \mathbb{R} (por ejemplo, $\{a_n\}_{n=1}^{\infty}$ puede ser una enumeración del conjunto Q de los números racionales). Sea

$$g(x) = \int_0^x 2t \operatorname{sen}\left(\frac{1}{t}\right) dt - x^2 \operatorname{sen}\left(\frac{1}{x}\right)$$

entonces $g'(x) = \cos\frac{1}{x}$. Por lo tanto, la función $f_n(x) = \frac{1}{n^2} \cos\left(\frac{1}{x-a_n}\right)$ es la derivada de una función y además sólo es discontinua en a_n .

Por el M-test de Weierstrass, la serie $\sum_{n=1}^{\infty} f_n$ converge uniformemente a una función f , o sea,

$$f(x) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \cos\left(\frac{1}{x-a_n}\right)$$

Además, por el teorema de convergencia uniforme y continuidad, se tiene que $C_f = \{x \in \mathbb{R} / f \text{ es continua en } x\} = \mathbb{R} - \{a_n / n \in \mathbb{N}\}$.

Así, f es la derivada de una función y además sólo es discontinua en el conjunto denso $\{a_n / n \in \mathbb{N}\}$.

Finalmente, se ha visto que el conjunto de discontinuidades de la derivada de una función diferenciable puede ser denso; pero el conjunto de continuidades también tiene que ser denso, lo que implica que este conjunto es no enumerable.

CONCLUSIONES

1. De los resultados obtenidos en este artículo, se sugiere la siguiente estrategia para construir funciones continuas y no diferenciables en todo punto de un intervalo I . (Hunt, 1994; Wen, 2000).
 - a) Determine una sucesión de funciones $\{f_n\}_{n=1}^{\infty}$ continuas en I .
 - b) Cada función $f_n : I \rightarrow \mathbb{R}$ tiene derivada por la izquierda y por la derecha en todo punto de I .

- c) Cada función f_n tiene una cantidad finita de extremos y si α_n es la distancia máxima entre dos extremos sucesivos, entonces $\lim_{n \rightarrow \infty} \alpha_n = 0$
- d) Si β_n es la mayor diferencia entre dos valores extremos sucesivos de f_n , entonces

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\alpha_n}{\beta_n} = 0$$

- e) Denote por $h_{n,x}$ los dos incrementos (uno positivo y el otro negativo) para los cuales $x + h_{n,x}$ es el primer extremo a izquierda (respectivamente a derecha) y

$$\left| f_n(x + h_{n,x}) - f_n(x) \right| \geq \frac{1}{2} \beta_n$$

- f) Pruebe que el signo de $f_n(x + h_{n,x}) - f_n(x)$ es independiente de $h_{n,x}$, para todo n lo suficientemente grande y para todo $x \in I$

2. Se ha probado que el conjunto de discontinuidades de la derivada de una función diferenciable puede ser denso. Sin embargo, se puede usar la teoría de categorías de Baire para probar que este conjunto es “pequeño” comparado con su complemento. (Folland, 2007; Gordon, 2001).
3. Un problema interesante es determinar las condiciones necesarias y suficientes para que un conjunto E sea el conjunto de discontinuidades de la derivada de una función diferenciable. Para resolver este problema se necesita conocer la teoría de categorías de Baire.

REFERENCIAS

- Ciesielski, K. C (2018). Monster in Calculus. *The American Mathematical monthly*, 125(8). pp. 739-744. doi-org/10.1080/00029890.2018.1502011.
- Ciesielski, K. C. (2022). Continuous Maps Admitting No Tangent Lines: A Centennial of Besicovitch Functions. *The American Mathematical Monthly*. doi.org/10.1080/000 29890. 2022.2071562.
- Dunham, W. (2018) *The Calculus Galery: Materpieces from Newton to Lebesgue*. Princeton University Press. USA.

- Edward, C. H. (1994). *The Historical Development of the Calculus* Springer-Verlag. USA.
- Folland, G. B. (2007). *Real Analysis: Modern Techniques and Their Applications*. Wiley. USA.
- Gordon, R. A. (2002). *Real analysis: A First Course* (segunda edición). Addison-Wesley, Higher Mathematics, USA.
- Hardy, G. H. (1916). Weierstrass's Non-differentiable function. *Transactions of the American Mathematical Society*, 17(3). 301-325.
- Hunt, B. R. (1994). The Prevalence of Continuous Nowhere Differentiable Functions. *The Amer. Math. Soc.* Vol. 122, No. 711-717
- Jarnicki, M. & Pflug, P. (2015). *Continuous Nowhere differentiable Functions: The Monster of analysis*. Springer Monographs in Mathematics.
- Wen. L. (2000). A nowhere differentiable continuous function. *The American Mathematical Monthly*, 107(5). 450-453. doi. org/10. 2307/2695303.



ARTÍCULO DE REVISIÓN

LA TRANSICIÓN ENERGÉTICA Y EL PAPEL DE LAS POLÍTICAS PÚBLICAS

ENERGY TRANSITION AND THE ROLE OF PUBLIC POLICIES

Carlos Chen Cheng

Universidad de Panamá, Facultad de Ingeniería, Panamá.

carlos.chen@up.ac.pa

<https://orcid.org/0000-0001-9288-6635>

Jorge Luis Martínez Ramírez

Universidad de Panamá, Facultad de Ingeniería, Panamá

jorgel.martinez@up.ac.pa

<https://orcid.org/0000-0002-1036-6167>

Arnold Osvaldo Muñoz Escudero

Universidad de Panamá, Facultad de Ingeniería, Panamá.

arnold.munoz01@up.ac.pa

<https://orcid.org/0009-0001-2589-9599>

Fecha de recepción: 9 de octubre de 2023

Fecha de aceptación: 14 de noviembre de 2023

DOI <https://doi.org/10.48204/j.tecno.v26n1.a4667>

RESUMEN

Este artículo de revisión se enfoca en analizar el impacto y la importancia de las políticas públicas en la transición hacia una matriz energética más limpia y sostenible. Se exploraron diversos aspectos, desde la creación de empleos hasta la reducción de la contaminación y la mejora de la seguridad energética. En los hallazgos, se destacó cómo las políticas de energía limpia generan empleos significativos en sectores como la energía solar y eólica, contribuyen a la reducción de la contaminación atmosférica y mejoran la salud pública al disminuir las emisiones de contaminantes, y fortalecen la seguridad energética al diversificar las fuentes de energía. La IX Cumbre de las Américas destacó la urgencia de avanzar hacia una transición energética justa, sostenible y renovable. Los compromisos reflejan un enfoque integral sobre eficiencia energética, equidad e innovación, buscando políticas y acciones que beneficien a todos en la región, resguarden derechos humanos y promuevan la resiliencia climática y la

sostenibilidad ambiental. Además, se subrayó el papel de estas políticas en la estimulación de la innovación tecnológica y la competitividad económica, así como en la diversificación económica y la resiliencia frente a crisis económicas y fluctuaciones en los precios de los recursos naturales. Se destacó cómo, a largo plazo, las políticas de energía limpia también reducen los costos para empresas y consumidores. En las perspectivas futuras, se señaló que la ambición climática se intensificará, con un enfoque en tecnologías emergentes, movilidad sostenible, inversión en infraestructura y colaboración internacional. Se espera que el sector privado desempeñe un papel crucial en esta transición hacia un mundo más limpio y sostenible. En última instancia, este artículo destaca la importancia de las políticas públicas como motores clave en la construcción de un futuro energético más limpio, saludable y equitativo, con la mira puesta en la mitigación del cambio climático y la creación de un mundo más sostenible para las generaciones venideras.

PALABRAS CLAVES

Políticas públicas, energía limpia, transición energética, sostenibilidad, impacto socioeconómico.

ABSTRACT

" This article focuses on analyzing the impact and importance of public policies in the transition toward a cleaner and more sustainable energy matrix. Various aspects were explored, ranging from job creation to pollution reduction and improvement of energy security. In the findings, it was highlighted how clean energy policies generate significant employment in sectors such as solar and wind energy, contribute to the reduction of atmospheric pollution, and improve public health by decreasing pollutant emissions. Furthermore, they strengthen energy security by diversifying energy sources. The IX Summit of the Americas emphasized the urgency of moving towards a just, sustainable, and renewable energy transition. The commitments reflect an integral approach on energy efficiency, equity, and innovation, seeking policies and actions that benefit everyone in the region, safeguard human rights, and promote climatic resilience and environmental sustainability. Additionally, the role of these policies in stimulating technological innovation and economic competitiveness was underscored, as well as in economic diversification and resilience against economic crises and fluctuations in natural resource prices. It was highlighted how, in the long term, clean energy policies also reduce costs for companies and consumers. In future perspectives, it was noted that climate ambition will intensify, focusing on emerging technologies, sustainable mobility, investment in infrastructure, and international collaboration. The private sector is expected to play a crucial role in this transition towards a cleaner and more sustainable world. Ultimately, this article underscores the importance of public policies as key drivers in building a cleaner, healthier, and more equitable energy future, with the aim set on mitigating climate change and creating a more sustainable world for the coming generations."

KEY WORDS

Public policies, clean energy, energy transition, sustainability, socioeconomic impact

INTRODUCCIÓN

En un mundo cada vez más consciente de los desafíos del cambio climático y la necesidad de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, la transición hacia fuentes de energía limpia se ha convertido en una prioridad global. Esta transición no sólo implica un cambio en la forma en que se genera y utiliza la energía, sino que también requiere el compromiso de gobiernos y legisladores para establecer políticas públicas efectivas que impulsen esta transformación.

El presente artículo se adentra en el papel crucial que desempeñan las políticas públicas en la transición hacia la energía limpia. Se explorará cómo estas políticas actúan como motores de cambio, dando forma a la adopción de tecnologías limpias, fomentando la eficiencia energética y promoviendo la sostenibilidad en todos los niveles de la sociedad. Desde la creación de empleos en el sector de energía renovable hasta la reducción de la contaminación y la mejora de la seguridad energética, las políticas públicas tienen un impacto profundo en la sociedad y la economía. Se compartirán ejemplos de éxito en países y regiones que han abrazado esta transición, así como los desafíos que han enfrentado en su camino. La IX Cumbre de las Américas de la Organización de los Estados Americanos (O.E.A.), celebrada en junio de 2022, subraya la imperante necesidad de acelerar la transición hacia una energía limpia, sostenible y renovable. Dicha transición no solo es crucial para enfrentar la crisis climática sino también para fomentar una equidad y justicia en el acceso y uso de recursos energéticos.

En un momento en que la urgencia de abordar el cambio climático es innegable, esta exploración del papel de las políticas públicas en la transición hacia la energía limpia arrojará luz sobre las oportunidades y obstáculos que se enfrentan en la búsqueda de un futuro más limpio y sostenible para las generaciones venideras.

MÉTODOLÓGÍA

La elaboración de este artículo sobre "El Papel de las Políticas Públicas en la Transición hacia Energía Limpia" requirió una metodología exhaustiva para garantizar la precisión y la profundidad en la exploración de los aspectos clave. A continuación, se describe la metodología empleada en cada etapa del proceso de investigación y redacción:

- Investigación Documental

Para establecer una base sólida para el artículo, se realizó una investigación documental exhaustiva. Se recurrió a fuentes académicas, informes gubernamentales, documentos de organizaciones internacionales y literatura especializada en energía limpia y

políticas públicas. Esto incluyó revistas científicas, informes de organismos como la Agencia Internacional de Energía y la Agencia de Protección Ambiental, así como textos académicos y libros.

- **Análisis de Literatura Científica**

Se llevó a cabo un análisis detallado de la literatura científica relacionada con el tema. Esto implicó la revisión de investigaciones previas sobre la transición hacia la energía limpia, el impacto de las políticas públicas y los ejemplos de éxito y desafíos en diferentes contextos nacionales e internacionales. La revisión de estudios previos proporcionó una base sólida para la comprensión de los conceptos clave y las tendencias.

- **Selección de Contenido**

Con base en la investigación documental y el análisis de la literatura científica, se seleccionaron los temas y puntos clave que se abordarían en el artículo. Esto incluyó la definición de conceptos fundamentales como "energía limpia" y "transición energética", así como la identificación de ejemplos relevantes y datos estadísticos para respaldar los argumentos.

- **Estructura del Artículo**

Se diseñó una estructura coherente para el artículo, siguiendo la secuencia propuesta. Esto incluyó la definición de secciones principales, como el marco teórico, el papel de las políticas públicas, ejemplos de éxito, desafíos, impacto en la sociedad y la economía, conclusiones y perspectivas futuras.

MARCO TEÓRICO

El marco teórico proporciona la base conceptual y contextual para comprender el papel fundamental de las políticas públicas en la transición hacia la energía limpia. Para lograr una comprensión completa, es esencial definir los conceptos clave y resaltar la importancia de la transición energética.

Definición de Energía Limpia y Transición Energética

La "energía limpia" se refiere a fuentes de energía que generan ninguna o una cantidad mucho menor de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) y otros contaminantes en comparación con los combustibles fósiles convencionales (Smith, 2018). Estas fuentes incluyen la energía solar, eólica, de las olas y mareas, hidroeléctrica, hidrógeno, biomasa y geotérmica, así como la energía nuclear en algunos casos (Jones, 2019).

La "transición energética" se refiere al proceso de cambio de sistemas de energía basados en combustibles fósiles hacia fuentes de energía más limpias y sostenibles

(Brown & Green, 2020). Este proceso implica una reconfiguración significativa de la infraestructura energética y la adopción de tecnologías más eficientes y respetuosas con el medio ambiente.

Importancia de la Transición Energética

La importancia de la transición hacia la energía limpia se hace evidente al considerar los desafíos ambientales y económicos a los que se enfrenta la humanidad en el siglo XXI. Las emisiones de dióxido de carbono (CO₂) y otros gases de efecto invernadero provenientes de la quema de combustibles fósiles son una de las principales causas del cambio climático (Smith, 2018). Este fenómeno tiene consecuencias graves, como el aumento del nivel del mar, eventos climáticos extremos y la pérdida de biodiversidad (IPCC, 2020).

Además de los riesgos ambientales, la dependencia continua de los combustibles fósiles también presenta riesgos económicos significativos, como la volatilidad de los precios del petróleo y la vulnerabilidad de la seguridad energética (IEA, 2019). Por lo tanto, la transición hacia la energía limpia se considera esencial para mitigar estos riesgos y promover la sostenibilidad a largo plazo (UNEP, 2021).

Los conceptos clave relacionados con la transición hacia la energía limpia y destaca la importancia de abordar los desafíos ambientales y económicos asociados con los combustibles fósiles. Además, sienta las bases para analizar el papel de las políticas públicas en la promoción de la energía limpia y su contribución a la sostenibilidad global.

El Papel de las Políticas Públicas

La política pública es cualquier cosa que los gobiernos decidan hacer o no hacer; se puede ver en el comportamiento de los funcionarios y agencias gubernamentales; define la relación del gobierno con su entorno. Una política es un curso de acción intencional que se toma para tratar un problema o inquietud. (Escuela Europea de Gerencia, 2022). Las políticas públicas desempeñan un papel fundamental en la configuración de la sociedad y la economía en la búsqueda de un futuro más sostenible y equitativo. En el contexto de la transición hacia la energía limpia, su influencia se vuelve especialmente relevante, estas políticas pueden acelerar o frenar la adopción de tecnologías y prácticas más amigables con el medio ambiente.

HISTORIA DE LAS POLÍTICAS ENERGÉTICAS

La Evolución de las Políticas Energéticas

La historia de las políticas energéticas es una narrativa en constante cambio, influenciada por una serie de factores socioeconómicos, políticos y tecnológicos. A lo largo del tiempo, estas políticas han evolucionado para abordar los desafíos cambiantes en el ámbito energético. En los inicios de la Revolución Industrial, a fines del siglo XVIII y principios del XIX, las políticas energéticas se centraban en el suministro de carbón y, más tarde, petróleo. Estas políticas se enfocaban en garantizar un suministro estable de combustibles fósiles para impulsar la industrialización.

Sin embargo, a medida que se comprendieron mejor los impactos ambientales de la quema de combustibles fósiles y se produjeron crisis energéticas, como la crisis del petróleo de la década de 1970, se comenzaron a implementar políticas orientadas hacia la eficiencia energética y la diversificación de fuentes de energía (Brown & Green, 2020).

Hitos Importantes en la Formulación de Políticas Energéticas

Década de 1950: La creación de la Agencia Internacional de Energía Atómica (AIEA) en 1957 reflejó el creciente interés en la energía nuclear como una fuente de energía limpia y estable. (IAEA, 2023).

- Década de 1970: La crisis energética de 1973 llevó a una mayor conciencia sobre la vulnerabilidad de las economías ante la dependencia del petróleo. Esto condujo a la promulgación de políticas de diversificación energética en muchos países. (Hayes, 2023).
- Década de 1990: El Protocolo de Kioto en 1997 fue un hito importante en la lucha contra el cambio climático, ya que estableció objetivos de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero para los países industrializados. (UNFCCC, 2023).
- Siglo XXI: Con el crecimiento de las energías renovables, muchas políticas se han centrado en promover la adopción de tecnologías como la energía solar y eólica. (IEA, 2017). Además, los acuerdos internacionales, como el Acuerdo de París de 2015, han impulsado un enfoque global en la reducción de emisiones. (UNFCCC, 2016).

INSTRUMENTOS DE POLÍTICA

Subsidios e Incentivos Fiscales

Los subsidios y los incentivos fiscales han sido herramientas clave para promover la

inversión en energía limpia. Los gobiernos pueden ofrecer desgravaciones fiscales a empresas y particulares que invierten en tecnologías de energía renovable, lo que reduce los costos iniciales y fomenta la adopción (Smith, 2018). El crédito fiscal por inversión en energía solar en los Estados Unidos ha contribuido significativamente al crecimiento de la energía solar residencial.

- Estándares de Eficiencia Energética

Los estándares de eficiencia energética imponen requisitos mínimos de rendimiento en equipos y dispositivos para reducir el consumo de energía. Estos estándares pueden aplicarse a electrodomésticos, vehículos y edificios. Por ejemplo, la introducción de estándares de eficiencia energética para vehículos ha llevado a mejoras significativas en la eficiencia del combustible y la reducción de emisiones (IEA, 2019).

- Cuotas de Energía Renovable

Las cuotas de energía renovable establecen objetivos obligatorios para la generación de energía a partir de fuentes renovables. Estas cuotas obligan a las empresas de servicios públicos a aumentar su participación en energía limpia en su mezcla energética total. La Unión Europea ha establecido objetivos ambiciosos para la generación de energía renovable como parte de su política de energía limpia (Jones, 2019).

REGULACIÓN Y NORMATIVAS

La regulación y las normativas desempeñan un papel crítico en la industria energética y, específicamente, en la transición hacia la energía limpia. Estas medidas gubernamentales son esenciales para garantizar un marco de funcionamiento eficiente y sostenible en el sector energético. Aquí, se analiza en detalle su importancia y cómo contribuyen a la promoción de tecnologías más limpias y sostenibles.

- Promulgación de Leyes y Regulaciones

La regulación en la industria energética es fundamental para garantizar la seguridad, la protección del medio ambiente y la equidad. La promulgación de leyes y regulaciones que aborden las emisiones de gases de efecto invernadero, los estándares de seguridad y la gestión de residuos nucleares es esencial para guiar el desarrollo de tecnologías limpias (UNEP, 2021).

- Fomento de Tecnologías Limpias

Las normativas también pueden fomentar la adopción de tecnologías limpias al establecer estándares de rendimiento ambiental. Por ejemplo, las regulaciones de control de emisiones en la industria eléctrica pueden requerir la instalación de

tecnologías de captura de carbono en las plantas de carbón, lo que reduce las emisiones de CO₂ (Brown & Green, 2020). A lo largo de la historia, las políticas energéticas han evolucionado desde un enfoque en la provisión de combustibles fósiles hacia la promoción de fuentes de energía limpia y sostenible. Los instrumentos de política, como subsidios, estándares de eficiencia energética y cuotas de energía renovable, han sido herramientas clave para acelerar esta transición. Además, la regulación y las normativas desempeñan un papel esencial en garantizar que la transición hacia la energía limpia se realice de manera segura y sostenible.

Acelerando la transición justa hacia la energía limpia, sostenible y renovable de la OEA

La IX Cumbre de las Américas de la Organización de los Estados Americanos (O.E.A), celebrada en junio de 2022 en Los Ángeles de Los Estados Unidos, subrayó la imperante necesidad de acelerar la transición hacia una energía limpia, sostenible y renovable. Dicha transición no solo es crucial para enfrentar la crisis climática sino también para fomentar una equidad y justicia en el acceso y uso de recursos energéticos. Los compromisos adoptados durante la cumbre, destacando la importancia de una transición energética justa e inclusiva y el papel crucial de la cooperación internacional y multisectorial. Los compromisos adoptados durante la cumbre enfatizaron la promoción de la eficiencia energética, la inclusión y descentralización, y la implementación de tecnologías limpias. Se priorizó la cooperación multilateral y la participación del sector privado para incrementar el uso de energías renovables y mejorar la infraestructura energética. Además, se reconoció la importancia de adoptar principios de gestión sostenible y responsable en el sector minero, que es fundamental para la transición energética.

Recordando el artículo 2.1 del Acuerdo de París, que incluye los objetivos: mantener el aumento de la temperatura media mundial muy por debajo de 2 °C con respecto a los niveles preindustriales, y proseguir los esfuerzos para limitar ese aumento de la temperatura a 1,5 °C con respecto a los niveles preindustriales, reconociendo que ello reduciría considerablemente los riesgos y los efectos del cambio climático; aumentar la capacidad de adaptación a los efectos adversos del cambio climático y promover la resiliencia al clima y un desarrollo con bajas emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), de un modo que no comprometa la producción de alimentos; y situar los flujos financieros en un nivel compatible con una trayectoria que conduzca a un desarrollo resiliente al clima y con bajas emisiones de gases de efecto invernadero; y recordando además el artículo 2.2 del Acuerdo de París, que establece que el Acuerdo se aplicará de modo que refleje la equidad y el principio de las responsabilidades comunes pero diferenciadas y las capacidades respectivas, a la luz de las diferentes circunstancias nacionales. (O.E.A., 2022).

Trabajar hacia la implementación de metas para la mitigación de emisiones para 2030 y elaborar, en la medida de lo posible, planes nacionales para acelerar el proceso de transición energética hacia una economía con bajas emisiones de carbono de acuerdo con las contribuciones determinadas a nivel nacional en el ámbito del Acuerdo de París, en un plazo coherente con los pasos que se den para los objetivos incluidos en el artículo 2 del Acuerdo de París (O.E.A., 2022)

Apoyar y promover la cooperación para aumentar la participación de todas las formas y tipos de energía renovable en los países de las Américas, de acuerdo con sus estrategias nacionales, como son las energías eólica, solar, eólica marina, bioenergía, geotérmica e hidroelectricidad y otras energías con niveles bajos de emisiones de carbono, en particular en los sectores eléctrico, industrial, de transporte y vivienda junto con tecnologías de captura, almacenamiento y eliminación del carbono y mecanismos de reducción de las emisiones, así como la inclusión de hidrógeno bajo en carbono que puede contribuir a alcanzar emisiones netas cero al 2050. (O.E.A., 2022).

Promover la cooperación multilateral para aumentar el uso de todas las formas y tipos de energías renovables en los países del Hemisferio, incluyendo programas tales como aquellos del Banco Interamericano de Desarrollo (BID), el Banco de Desarrollo del Caribe (BDC), el Banco de Desarrollo de América Latina (CAF), Banco Centroamericano de Integración Económica (BCIE), la Iniciativa Energías Renovables en América Latina y el Caribe (RELAC) y la Alianza de Energía y Clima de las Américas (ECPA), entre otros, para incluir la participación de todos los Estados, según corresponda. (O.E.A., 2022). Crear condiciones favorables y justas para la participación de capitales públicos y privados, nacionales e internacionales, y organismos multilaterales en el desarrollo de nuevas fuentes de energía limpia y renovable, así como el fomento a la transferencia de conocimientos en temas de eficiencia energética y tecnologías disruptivas que permitan mitigar las emisiones de gases de efecto invernadero, tales como la incorporación del uso de biocombustibles sostenibles y del hidrógeno bajo en carbono, y la movilidad eléctrica. (O.E.A., 2022).

La IX Cumbre de las Américas ha resaltado la urgencia de una transición energética que sea no solo sostenible y renovable, sino también justa e inclusiva. Los compromisos adoptados reflejan una visión integral que abarca la eficiencia energética, la equidad, la innovación y la cooperación multisectorial. Es crucial que estos compromisos se traduzcan en acciones concretas y políticas eficaces que promuevan una transición energética que beneficie a todos los habitantes de las Américas, protegiendo los derechos humanos y fomentando la resiliencia climática y la sostenibilidad ambiental.

Estudios de Caso y Ejemplos

A continuación, se presentan algunos casos y ejemplos representativos de transición energética

1. Alemania: La Revolución Energética (Energiewende)

Alemania es un ejemplo destacado de una nación que ha implementado políticas públicas efectivas para la transición hacia la energía limpia. Su iniciativa "Energiewende" busca reducir drásticamente las emisiones de carbono y aumentar la proporción de energía renovable en su mezcla energética. Alemania ha establecido ambiciosos objetivos de generación de energía renovable y ha brindado incentivos significativos para la adopción de tecnologías como la energía solar y eólica. Como resultado, el país ha aumentado sustancialmente la participación de energía renovable en su matriz energética y ha creado empleos en el sector de las energías renovables (BMU, 2021).

2. Noruega: Electrificación del Transporte

Noruega ha implementado políticas para promover la adopción de vehículos eléctricos (VE) de manera efectiva. Ofrece exenciones fiscales, incentivos para la compra de VE y ha desarrollado una extensa infraestructura de carga. Esto ha llevado a una rápida transición hacia el transporte eléctrico, con más del 60% de las ventas de vehículos nuevos en Noruega siendo VE en 2020. Además, Noruega ha exportado sus conocimientos en esta área a nivel mundial (IEA, 2021).

3. Dinamarca: Líder en Energía Eólica

Dinamarca se ha destacado como líder mundial en energía eólica. Desde la década de 1970, el país ha invertido de manera significativa en la investigación y desarrollo de tecnologías eólicas y ha implementado políticas que fomentan la generación de energía a partir del viento. La Estrategia Energética de Dinamarca apunta a eliminar por completo las emisiones de carbono para 2050. Además, el país ha desarrollado una red de empresas especializadas en energía eólica que exportan sus productos y conocimientos a nivel global (Danish Energy Agency, 2021). Este ejemplo destaca cómo una visión a largo plazo y un compromiso sostenido pueden transformar una nación en un líder en energía renovable.

4. California, Estados Unidos: Avances en Energía Solar

California ha sido un líder en la promoción de la energía solar en los Estados Unidos. A través de una combinación de incentivos fiscales, programas de financiamiento accesibles y estándares de energía renovable ambiciosos, California ha experimentado un crecimiento significativo en la adopción de paneles solares. En particular, el

programa California Solar Initiative (CSI) ha sido fundamental para incentivar la instalación de sistemas solares residenciales y comerciales. California ha demostrado cómo un estado puede aprovechar su capacidad de regulación y su compromiso con la sostenibilidad para fomentar la transición hacia la energía limpia (California Energy Commission, 2021).

Desafíos y Obstáculos:

A pesar de los beneficios evidentes de las políticas públicas en favor de la energía limpia, existen desafíos y obstáculos significativos que a menudo dificultan su implementación efectiva. Estos desafíos pueden variar según el contexto político, económico y social de cada país o región, pero algunos son comunes en todo el mundo. Aquí, se exploran los principales desafíos y obstáculos que enfrentan estas políticas. (Borenstein & Kellogg, 2021).

- Resistencia de la Industria de Combustibles Fósiles

La resistencia de la industria de combustibles fósiles ha sido un obstáculo importante para la implementación de políticas de energía limpia. Las empresas petroleras y de gas a menudo han luchado contra la transición hacia fuentes de energía renovable, utilizando su influencia política y recursos financieros para retrasar o socavar políticas favorables a la energía limpia. Este desafío destaca la importancia de la resistencia a los cambios en la industria energética (Hoffman, 2019).

- Cambios Políticos y Volatilidad

Los cambios políticos y la volatilidad en la toma de decisiones gubernamentales pueden tener un impacto significativo en la continuidad de las políticas de energía limpia. Un nuevo liderazgo político puede cambiar las prioridades y dismantlar políticas previas de apoyo a la transición energética. Esta inestabilidad política puede dificultar la inversión a largo plazo en energía limpia y crear incertidumbre para los inversores y la industria (Hsu et al., 2015).

- Falta de Coordinación Internacional

La falta de coordinación internacional en políticas de energía limpia es un desafío importante. A pesar de los acuerdos internacionales como el Acuerdo de París, la implementación efectiva de políticas puede variar ampliamente de un país a otro. Esto puede llevar a una desigualdad en la adopción de tecnologías limpias y dificultar la consecución de objetivos globales de reducción de emisiones. Un enfoque más cohesivo y colaborativo entre naciones es esencial para abordar los desafíos globales del cambio climático (UNFCCC, 2021).

- Dependencia de Recursos Limitados

La dependencia continua de recursos limitados, como minerales raros para baterías de almacenamiento y componentes de paneles solares, puede representar un desafío en la

transición hacia la energía limpia. La extracción de estos recursos puede tener impactos ambientales significativos y crear tensiones geopolíticas. La investigación en tecnologías de reciclaje y la búsqueda de alternativas sostenibles son esenciales para mitigar este desafío (European Commission, 2021). Los ejemplos de éxito demuestran que las políticas públicas efectivas pueden llevar a una transición exitosa hacia la energía limpia, con beneficios tanto ambientales como económicos. Sin embargo, los desafíos siguen siendo significativos y requieren un enfoque constante y colaborativo para abordarlos. La coordinación internacional, la diversificación de recursos y el compromiso a largo plazo son elementos clave en el camino hacia un sistema energético más limpio y sostenible.

Impacto en la Sociedad y la Economía:

La implementación de políticas públicas en favor de la energía limpia tiene un impacto significativo en la sociedad y la economía en múltiples dimensiones. Aquí, se explorarán en detalle los efectos positivos que estas políticas generan en ambos ámbitos.

- **Creación de Empleos**

Una de las ventajas más destacadas de las políticas públicas a favor de la energía limpia es la creación de empleos. La transición hacia fuentes de energía más limpias y sostenibles requiere inversiones en tecnologías de energía renovable, eficiencia energética, investigación y desarrollo. Estas inversiones generan empleos en sectores relacionados, desde la fabricación y la construcción hasta la operación y el mantenimiento de sistemas de energía limpia. (World Economic Forum, 2021). La industria de la energía solar y eólica ha experimentado un crecimiento significativo en empleos en países con políticas sólidas de energía limpia. Los trabajadores se emplean en la instalación de paneles solares, la fabricación de turbinas eólicas y la gestión de parques eólicos y solares. Esta expansión en el empleo no solo beneficia a la economía, sino que también proporciona oportunidades laborales locales y estabilidad a comunidades afectadas por cambios en la industria energética (IRENA, 2021).

- **Reducción de la Contaminación y Mejora de la Salud Pública**

Las políticas públicas que promueven la energía limpia también tienen un impacto directo en la reducción de la contaminación atmosférica y, por ende, en la mejora de la salud pública. La quema de combustibles fósiles, como el carbón y el petróleo, para la generación de energía y el transporte, emite una serie de contaminantes perjudiciales, incluyendo dióxido de azufre, óxidos de nitrógeno y partículas finas, que contribuyen a problemas de salud como enfermedades respiratorias, cardiovasculares y cáncer. Al reducir la dependencia de los combustibles fósiles y aumentar el uso de fuentes de energía limpia, se disminuyen las emisiones de estos contaminantes, lo que tiene un

impacto directo en la calidad del aire y la salud de la población. Esto puede traducirse en menores costos de atención médica y una población más saludable y productiva (EPA, 2021).

- Seguridad Energética

Las políticas públicas en favor de la energía limpia también mejoran la seguridad energética de un país. Al diversificar las fuentes de energía y reducir la dependencia de los combustibles fósiles importados, se reduce la vulnerabilidad a las interrupciones en el suministro de energía debido a conflictos geopolíticos o eventos naturales. La promoción de la energía solar y eólica reduce la dependencia de los precios y la disponibilidad del petróleo y el gas natural en el mercado internacional. Esto puede contribuir a la estabilidad económica y al evitar fluctuaciones bruscas en los precios de la energía (IEA, 2019). Las políticas públicas en favor de la energía limpia tienen un impacto positivo en la sociedad y la economía al impulsar la creación de empleos, reducir la contaminación del aire y mejorar la salud pública, así como fortalecer la seguridad energética. Estos beneficios se traducen en una economía más sostenible y resiliente, al tiempo que contribuyen a la lucha contra el cambio climático y a la promoción de un futuro más limpio y saludable.

- Innovación Tecnológica y Competitividad

Las políticas públicas que fomentan la energía limpia a menudo impulsan la innovación tecnológica. La inversión en investigación y desarrollo de tecnologías de energía renovable y eficiencia energética conlleva avances tecnológicos significativos. Esto no solo hace que las fuentes de energía limpia sean más efectivas y accesibles, sino que también impulsa la competitividad económica a nivel nacional e internacional.

Los avances en la tecnología de baterías impulsados por políticas de vehículos eléctricos han llevado a una reducción en los costos de almacenamiento de energía, lo que ha ampliado las aplicaciones de la energía solar y eólica. Las empresas que lideran estas innovaciones pueden ganar una ventaja competitiva en el mercado global de tecnologías limpias, creando empleos y atrayendo inversión extranjera (BNEF, 2021).

- Diversificación Económica y Resiliencia

La transición hacia la energía limpia también diversifica la economía de un país o región. Tradicionalmente, muchas economías han dependido en gran medida de las industrias basadas en combustibles fósiles, lo que las hace vulnerables a las fluctuaciones en los precios de los recursos naturales. Al promover sectores como la energía renovable, la eficiencia energética y la movilidad sostenible, las políticas de energía limpia diversifican la economía y la hacen más resistente a las crisis económicas y las variaciones en los precios de la energía (IRENA, 2020).

- Reducción de Costos a Largo Plazo

Aunque la inversión inicial en energía limpia puede ser significativa, a largo plazo, las políticas públicas en favor de la energía limpia tienden a reducir los costos para las empresas y los consumidores. A medida que las tecnologías de energía limpia maduran y se vuelven más ampliamente adoptadas, los costos de generación de energía disminuyen. Esto se traduce en facturas de energía más bajas para los consumidores y una mayor competitividad para las empresas. Los costos de la energía solar han disminuido drásticamente en las últimas décadas debido a avances tecnológicos y economías de escala. Esto ha hecho que la energía solar sea una opción cada vez más asequible para los hogares y las empresas, lo que reduce los gastos a largo plazo y fomenta la adopción generalizada (Lazard, 2020).

El impacto socioeconómico de las políticas públicas en favor de la energía limpia va más allá de la creación de empleos y la reducción de la contaminación. También impulsa la innovación, la diversificación económica, la resiliencia y la reducción de costos a largo plazo. Estos efectos positivos contribuyen al desarrollo sostenible y a la construcción de una economía más fuerte y equitativa, al tiempo que ayudan a abordar los desafíos del cambio climático.

CONCLUSIONES

Las políticas públicas en favor de la energía limpia tienen un impacto positivo en la sociedad y la economía al impulsar la creación de empleos, reducir la contaminación del aire y mejorar la salud pública, así como fortalecer la seguridad energética. Estos beneficios se traducen en una economía más sostenible y resiliente, al tiempo que contribuyen a la lucha contra el cambio climático y a la promoción de un futuro más limpio y saludable.

La IX Cumbre de las Américas destacó la urgencia de avanzar hacia una transición energética justa, sostenible y renovable. Los compromisos reflejan un enfoque integral sobre eficiencia energética, equidad e innovación, buscando políticas y acciones que beneficien a todos en la región, resguarden derechos humanos y promuevan la resiliencia climática y la sostenibilidad ambiental. Este artículo ha explorado el impacto significativo que las políticas públicas en favor de la energía limpia tienen en la sociedad y la economía. Los principales hallazgos y conclusiones son los siguientes:

- Creación de Empleos: Las políticas de energía limpia son motores clave para la creación de empleos en sectores como la energía solar, eólica y la eficiencia energética. Estos empleos no solo benefician a la economía, sino que también generan oportunidades locales y estabilidad económica.

- **Reducción de la Contaminación y Salud Pública:** La transición hacia la energía limpia reduce la contaminación del aire y mejora la salud pública al disminuir las emisiones de contaminantes relacionados con enfermedades respiratorias y cardiovasculares.
- **Seguridad Energética:** Las políticas de energía limpia fortalecen la seguridad energética al diversificar las fuentes de energía y reducir la dependencia de los combustibles fósiles importados, lo que contribuye a la estabilidad económica.
- **Innovación Tecnológica y Competitividad:** Las inversiones en energía limpia impulsan la innovación tecnológica y la competitividad económica al crear avances tecnológicos y oportunidades para las empresas en el mercado global de tecnologías limpias.
- **Diversificación Económica y Resiliencia:** La diversificación de la economía a través de políticas de energía limpia hace que una región sea más resistente a las crisis económicas y menos vulnerable a las fluctuaciones en los precios de los recursos naturales.
- **Reducción de Costos a Largo Plazo:** A pesar de la inversión inicial, las políticas de energía limpia tienden a reducir los costos a largo plazo para empresas y consumidores a medida que las tecnologías maduran y se vuelven más accesibles.
- **Diversificación Económica y Resiliencia:** La diversificación de la economía a través de políticas de energía limpia hace que una región sea más resistente a las crisis económicas y menos vulnerable a las fluctuaciones en los precios de los recursos naturales.
- **Reducción de Costos a Largo Plazo:** A pesar de la inversión inicial, las políticas de energía limpia tienden a reducir los costos a largo plazo para empresas y consumidores a medida que las tecnologías maduran y se vuelven más accesibles.

Perspectivas Futuras:

Las tendencias futuras en políticas públicas relacionadas con la energía limpia se perfilan como cruciales para acelerar la transición energética a nivel global. Algunas perspectivas clave incluyen:

- **Mayor Ambición Climática:** Se espera que los países refuercen sus compromisos para abordar el cambio climático. El Acuerdo de París y los esfuerzos por limitar el calentamiento global a 1.5°C requerirán un aumento en la inversión en energía limpia y una rápida reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero.

- **Desarrollo de Tecnologías Emergentes:** La investigación y el desarrollo de tecnologías emergentes, como el almacenamiento de energía avanzado, la captura de carbono y el hidrógeno verde, serán esenciales para lograr una transición completa hacia la energía limpia.
- **Movilidad Sostenible:** Las políticas de transporte sostenible y la adopción de vehículos eléctricos continuarán siendo una prioridad para reducir las emisiones en el sector del transporte.
- **Inversión en Infraestructura:** La inversión en infraestructura energética limpia, incluyendo la expansión de redes eléctricas inteligentes y la mejora de la eficiencia energética en edificios, será esencial para acelerar la adopción de tecnologías limpias.
- **Colaboración Internacional:** La cooperación internacional será fundamental para abordar los desafíos globales del cambio climático y facilitar la transferencia de tecnología y conocimientos en políticas de energía limpia.
- **Participación del Sector Privado:** El sector privado desempeñará un papel crucial en la inversión y la innovación en energía limpia. Se espera que las empresas líderes en sostenibilidad sean impulsoras del cambio.

A través de esta investigación se ha podido establecer que el futuro de la energía limpia depende de la voluntad política, la inversión estratégica, la colaboración global y las políticas públicas, las cuales desempeñan un papel central en la transición hacia una matriz energética más sostenible que pueda mitigar los efectos del cambio climático, crear un mundo más limpio y saludable para las futuras generaciones.

REFERENCIAS

- BMU (Ministerio Federal de Medio Ambiente, Conservación de la Naturaleza y Seguridad Nuclear). (2021). Energiewende en breve. <https://www.bmu.de/en/topics/energy/energy-transition/>
- BNEF (BloombergNEF). (2021). New Energy Outlook 2021. <https://about.bnef.com/new-energy-outlook/>
- Borenstein, S. & Kellogg, S. (2021). Challenges of a Clean Energy Transition and Implications for Energy Infrastructure Policy. <https://epic.uchicago.edu/research/challenges-of-a-clean-energy-transition-and-implications-for-energy-infrastructure-policy/>

- Brown, A., & Green, B. (2020). Energy Transition: Pathways towards a Sustainable Future. Oxford University Press.
- California Energy Commission. (2021). California Solar Initiative (CSI). <https://www.cpuc.ca.gov/industries-and-topics/electrical-energy/demand-side-management/california-solar-initiative>
- Danish Energy Agency. (2021). Energy Policy in Denmark. <https://ens.dk/en/our-responsibilities/energy-climate-politics/danish-climate-policies>
- EPA (Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos). (2021). Air Quality and Health. <https://espanol.epa.gov/espanol/aire>
- Escuela Europea de Gerencia. (2022). ¿Qué son las políticas públicas? <https://eegerencia.eu/blog/que-son-las-politicas-publicas/>
- European Commission. (2021). A New Circular Economy Action Plan. https://ec.europa.eu/environment/circular-economy/strategy/circular-economy-action-plan_en
- Hayes, A. (2023). 1973 Energy Crisis: Causes and Effects. <https://www.investopedia.com/1973-energy-crisis-definition-5222090>
- Hoffman, A. J. (2019). Reflections on the Oil Industry and Climate Change. Nature Energy.
- Hsu, A., & Pizer, W. A. (2015). Renewable Energy and U.S. Emissions Trading Markets: Observations and Outlook. Environmental Science & Technology.
- IAEA. (2023). Historia. <https://www.iaea.org/es/el-oiea/historia>
- IEA (Agencia Internacional de Energía). (2019). World Energy Outlook 2019. <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2019>
- IEA (Agencia Internacional de Energía). (2019). World Energy Outlook 2019. <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2019>
- IEA (Agencia Internacional de Energía). (2021). Global EV Outlook 2021. <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2021>

- IEA. (2017). Renewable Energy Policy Network for the 21st Century (REN21). <https://www.iea.org/policies/5101-renewable-energy-policy-network-for-the-21st-century-ren21>
- IPCC (Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático). (2020). Informe Especial sobre el Calentamiento Global de 1.5°C. <https://www.ipcc.ch/sr15/>
- IRENA (Agencia Internacional de Energías Renovables). (2020). Post-COVID Recovery: An Agenda for Resilience, Development, and Equality. <https://irena.org/publications/2020/Apr/Post-Covid-Recovery-An-Agenda-for-Resilience-Development-and-Equality>
- IRENA (Agencia Internacional de Energías Renovables). (2021). Renewable Energy and Jobs - Annual Review 2021. <https://www.irena.org/publications/2021/Oct/Renewable-Energy-and-Jobs-Annual-Review-2021>
- Jones, C. (2019). Clean Energy: Principles of Solar, Wind, and Hydroelectric Power. Wiley.
- Lazard. (2020). Lazard's Levelized Cost of Energy Analysis—Version 14.0. <https://lazard.com/media/kwrjairh/lazards-levelized-cost-of-energy-version-140.pdf>
- O.E.A. (2022). Acelerando la transición justa hacia la energía limpia, sostenible y renovable.
- Smith, J. (2018). Clean Energy Solutions for a Sustainable Future. Cambridge University Press.
- UNEP (Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente). (2021). Perspectivas de la Economía Verde: Para una Recuperación Sostenible. <https://www.unep.org/es/resources/perspectivas-del-medio-ambiente-mundial-6>
- UNFCCC (Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático). (2021). The Paris Agreement. <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement/the-paris-agreement>

UNFCCC. (2015). Acuerdo de París. Artículo 2.1.

UNFCCC. (2016). The Paris Agreement. <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement>

UNFCCC. (2023). ¿Qué es el Protocolo de Kyoto? https://unfccc.int/es/kyoto_protocol

World Economic Forum. (2021). Why do green investments create more jobs? Experts explain. <https://www.weforum.org/agenda/2021/12/jobs-renewable-energy-fossil-fuels/>



SÍNTESIS DE COMPUESTOS ORGÁNICOS CON PROPIEDADES CATIONICAS E IMPLEMENTACIÓN DE LA ESPECTROMETRÍA DE MASAS COMO MÉTODO DE ELUCIDACIÓN ESTRUCTURAL

SYNTHESIS OF ORGANIC COMPOUNDS WITH CATIONICA PROPERTIES AND IMPLEMENTATION OF MASS SPETROMETRY AS STRUCTURAL ELUCIDATION TECHNIQUE

Carlos H. Ríos Martínez

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

carlos.rios-m@up.ac.pa

<http://orcid.org/0000-0003-0452-7224>

María Bocanegra

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

maryesther1318@gmail.com

<http://orcid.org/0009-0003-2643-7542>

Rugyel Reyes

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

reyes.rugyel@outlook.com

<http://orcid.org/0009-0005-1194-5805>

Fecha de recepción: 1 de agosto de 2023

Fecha de aceptación: 17 de noviembre de 2023

DOI <https://doi.org/10.48204/j.tecno.v26n1.a4668>

RESUMEN

Este trabajo de investigación utilizó la Espectrometría de Masas como técnica principal para la elucidación de las estructuras de compuestos orgánicos con propiedades cationicas sintetizados en nuestro grupo de investigación. Nuestro principal objetivo fue la optimización de la síntesis de dos compuestos cationicos amidínicos libres y dos *N*-sustituídos y la síntesis de una sal de fosfonio como posibles compuestos antiparasitarios. Para la síntesis de los compuestos amidínicos se utilizaron diferentes tipos de nitrilos comercialmente disponibles que, mediante un acoplamiento con compuestos

nitrogenados, en nuestro caso, cloruro de amonio y *p*-metoxianilina, dieron como resultado la obtención de las amidinas deseadas. En el caso de la sal de fosfonio, la reacción se realizó por un ataque nucleofílico a al 2-bromoetanol dando como resultado la obtención del producto deseado. Para la elucidación estructural se utilizó la técnica de Espectrometría de Masas de Masas utilizando la ionización por electrospray en modo positivo y se realizó un barrido de la energía de fragmentación desde 15 V hasta 30 V realizando un aumento gradual de cada 5V, dando como resultado, la confirmación de las estructuras de los compuestos sintetizados.

PALABRAS CLAVES

Políticas públicas, energía limpia, transición energética, sostenibilidad, impacto socioeconómico.

ABSTRACT

This investigation used Mass Spectrometry as the main technique for the elucidation of organic compounds structures with cationic properties synthesized in our research group. Our main objective was the optimization of the synthesis of two free amidine cationic compounds and two N-substituted and the synthesis of one phosphonium salt as possible antiparasitic compounds. For the synthesis of amidine compounds, different types of commercially available nitriles were used, which by coupling with nitrogen compounds, in our case ammonium chloride and *p*-methoxyaniline, resulted in the desired amidines. In the case of phosphonium salt, the reaction was performed by a nucleophilic attack to 2-bromoethanol resulting in the desired product. Structural elucidation of the synthesized compounds was performed using ionization by electrospray in positive mode. We used a gradient in the fragmentation energy from 15 V to 30 V, making a gradual increase of every 5V, resulting in the confirmation of the structures of the synthesized compounds.

KEY WORDS

Amidines, phosphonium salts, Mass Spectrometry, Liquid Chromatography, Organic Synthesis.

INTRODUCCIÓN

Es bien conocido que la espectroscopía de Resonancia Magnética Nuclear es actualmente la técnica de elucidación estructural por excelencia en Química Orgánica. Ofrece grandes ventajas en comparación con otras técnicas de elucidación estructural. Algunas de estas ventajas son; ser una técnica no destructiva de la muestra, lo que permite la recuperación de manera intacta de las moléculas a ser analizadas. Su alta sensibilidad permite la elucidación de estructuras utilizando muy poca cantidad de muestra y la diversidad de experimentos de resonancia nuclear, permite incluso, estudiar la estructura de las moléculas en su tridimensionalidad, en algunas ocasiones.

Esta ventaja ofrecida en este instrumento, no lo podemos encontrar en la República de Panamá ya que actualmente no se encuentra disponible un espectrómetro de RMN, lo que nos obliga a realizar la elucidación de las estructuras utilizando otras metodologías. La Vicerrectoría de Investigación y Postgrado de la Universidad de Panamá adquiere un Cromatógrafo Líquido de Ultra Resolución acoplado a un Espectrómetro de Masas (UPLC-EM). Es aquí que nuestro grupo de investigación decidió utilizar esta técnica como reemplazo a la Resonancia Magnética Nuclear, utilizando la Espectrometría de Masas de Masas.

La espectrometría de masas en tándem, también conocida como Espectrometría de Masas de Masas (EM/EM), es la técnica más utilizada como herramienta analítica para identificar y cuantificar compuestos en mezclas complejas. Dicha técnica se basa en el acoplamiento de dos etapas de análisis de masas en el tiempo o en el espacio. El espectrómetro de masas ubicado en los laboratorios de la VIP, utiliza la ionización por electroespray (ESI), la cual proporciona abundante información estructural (Yost and Fetterolf, 1983) (De Hoffmann, 1996) (Xiao *et al.*, 2021) (Fang *et al.*, 2021). La adquisición en tándem es un proceso en el que un ion formado en una fuente de iones es seleccionado en la primera etapa de análisis (anализador de masas 1) y fragmentado por la colisión entre el ion que ha sido seleccionado (ion molecular) con moléculas de un gas inerte (gas argón), recibiendo el nombre de disociación inducida por colisión (CID). La CID se suele dividir en dos etapas; en la primera, la energía traslacional del ion molecular se convierte en energía interna tras colisionar con la molécula de gas inerte. En la segunda etapa, esta energía interna se transforma en energía de fragmentación, en donde el ion molecular se divide en distintos fragmentos y luego estos fragmentos con carga positiva o negativa, se analizan en la segunda etapa de análisis: analizador de masas 2 (Glish & Burinsky, 2008). Este tipo de análisis ofrece una gran selectividad ya que permite la posibilidad de aislar nuestro ion molecular en la celda de colisión, eliminando así, otros iones o fragmentos que puedan interferir.

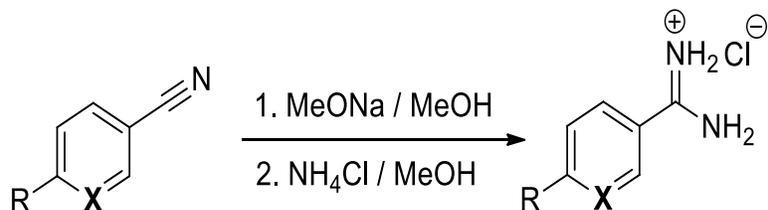
Tradicionalmente la EM/EM se ha desarrollado con analizadores de tipo triple cuadrupolo (TQ), donde dos cuadrupolos (Q) están acoplados a través de un cuadrupolo intermedio que se usa como celda de colisión (q). En el primer cuadrupolo (Q₁), se selecciona la relación m/z de interés, que se suele denominar ion precursor. Este pasa a través de la celda de colisión (q) donde se fragmenta y los iones producto son separados por el segundo cuadrupolo. Aunque se denomine triple cuadrupolo, actualmente la celda de colisión suele ser un hexapolo u octapolo, ya que su diseño va dirigido a potenciar la eficiencia de la transmisión de los iones desde la celda de colisión hasta el Q₂, además, este presenta un espacio adecuado para la fragmentación.

La adquisición mediante un triple cuadrupolo ofrece una gran versatilidad, dependiendo del modo en que opera cada uno de los dos cuadrupolos (Q_1 y Q_2). Cada uno de estos modos de adquisición presenta unas características que lo hacen idóneo para un objetivo concreto. Los modos de adquisición que se pueden aplicar son: barrido de todos los iones, Adquisición de un ion seleccionado (SIM), Monitoreo de reacción seleccionada (SRM), barridos de iones producto, de iones precursor o pérdidas neutras. De todos estos, el barrido de todos los iones es el modo utilizado para el análisis de las moléculas caracterizadas durante la realización de esta investigación.

MATERIALES Y MÉTODOS

Para el desarrollo del trabajo se utilizaron los siguientes equipos y materiales: Los espectros de fragmentación de masas de masas (EM/EM), se registraron en modo positivo mediante la técnica de ionización por electroespray (ESI^+) a diferentes energías de colisión (15, 20, 25 y 30) voltios, con un aparato MS Xevo® TQD. Los espectros de masas se obtuvieron por infusión directa en un aparato MS Xevo® TQD o en un Cromatógrafo líquido de ultra resolución (UPLC) Acquity clase H, Waters con un detector de arreglo de diodos (PDA) acoplado a un espectrómetro de masas MS Xevo® TQD, utilizando mayormente de dos a tres voltajes de cono diferentes (20, 25 y 30V). La detección fue tanto en modo positivo (ESI^+) y/o negativo (ESI^-) de acuerdo con el tipo de molécula. La columna utilizada fue en fase reversa marca ACQUITY UPLC®BEH C18-1.7 μm de dimensiones 2.1 mm x 50 mm y ACQUITY UPLC®BEH C18-1.7 μm de dimensiones 2.1mm x 100 mm. Los filtros de jeringa utilizados fueron de 13 mm de diámetro con una membrana hidrofílica PTFE, un tamaño de poro de 0.22 μm de la marca NEWSTAR. Las muestras se analizaron utilizando como fase móvil mezclas de A: MeCN, B: H_2O / CH_3COOH (0.1%). Se utilizaron los siguientes gradientes; Un primer gradiente que inició con una mezcla A/B (15:85) hasta llegar a una mezcla de A/B (95:5) y un segundo gradiente iniciando con una mezcla A/B (70:30) hasta llegar a A/B (100:0). El flujo utilizado fue de 0.2 mL/min. La detección por absorbancia en Ultravioleta (UV) se realizó entre 190 a 400 nm. Las cromatografías de capa fina (CCF) fueron realizadas en cromatofolios en láminas de aluminio revestidos de gel de sílice con indicador fluorescente a 254 nm, marca Sigma-Aldrich. Los rotaevaporadores utilizados fueron de la marca Buchi serie R-124 y serie R-215. Los reactivos usados fueron de origen comercial de la marca Sigma-Aldrich®, los disolventes utilizados fueron de grado ACS y grado HPLC.

Metodología general para la síntesis de amidinas aromáticas libres 3 y 4.

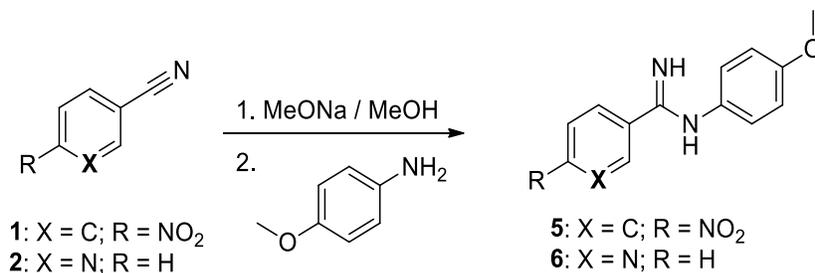


1: X = N; R = H
2: X = C; R = NO₂

3: X = N; R = H
4: X = C; R = NO₂

A una disolución en agitación de 1 equivalente de derivados de nitrilo en MeOH, se le añade 2.0 equivalentes de NaOMe. La temperatura y el tiempo de reacción se describirá en cada experimento. La reacción es monitoreada por CCF hasta observar la formación del compuesto intermedio. Una vez se observa la formación del intermedio, se añade 1.1 equivalentes de cloruro de amonio (NH₄Cl) a la mezcla de reacción en agitación. La reacción se deja en agitación continua por el tiempo descrito en cada reacción. La reacción es monitoreada por CCF hasta observar que se haya consumido todo el compuesto intermedio o que ya no se observe avance de esta. Terminada la reacción, se filtra la mezcla de reacción y se evapora el MeOH a presión reducida, obteniéndose así el crudo de reacción (Patai, 2010)(Schaefer and Peters, 1961).

Metodología general para la síntesis de amidinas N-sustituidas 7 y 8.



1: X = C; R = NO₂
2: X = N; R = H

5: X = C; R = NO₂
6: X = N; R = H

A una disolución en agitación de los derivados de nitrilo en MeOH se le añade 2.0 equivalentes de NaOMe. La reacción se deja en agitación a temperatura ambiente por el tiempo descrito en cada reacción. La reacción es monitoreada por CCF hasta observar la formación del compuesto intermedio como se indicará para cada reacción.

Una vez se observa la formación del intermedio, se añade 1.1 equivalentes de *p*-metoxianilina a la mezcla de reacción en agitación. La reacción se deja en agitación continua por el tiempo descrito en cada reacción. La reacción es monitoreada por CCF hasta observar que se haya consumido todo el compuesto intermedio o que ya no se observe avance de esta. Terminada la reacción, se filtra la mezcla de reacción y se evapora el MeOH a presión reducida utilizando los rotaevaporadores, obteniéndose un crudo de reacción.

Metodología general para la purificación amidinas *N*-sustituidas.

Método A:

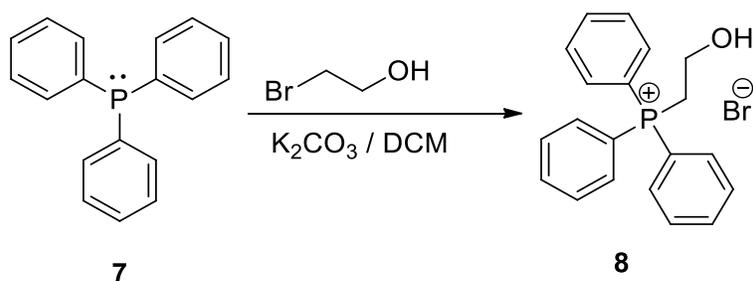
Se utilizó la técnica de cromatografía en columna (CC) en fase normal (gel de sílice grado técnico, tamaño de poro 60 Å, con un tamaño de partícula de 230-400 mesh, 40-63 µm). La búsqueda de condiciones para la purificación de los productos deseados se realizó por CCF. De esta manera se escogió la altura de cada columna. El diámetro de la columna utilizado fue de 2.4 cm y el método de empacado de la columna fue en seco. Para el empacado en seco, se pesó el gel de sílice y se agregó a una columna con fita hasta obtener la altura deseada. Para preparar la cabeza de columna, se pesó 2 gramos del gel de sílice en un vaso químico. El crudo de reacción se redisolvió en acetona, seguidamente se agregó gota a gota al gel de sílice en el vaso químico removiendo el gel de sílice con cuidado con una espátula hasta observar que todo el crudo de reacción se adsorbiera. Luego, el gel de sílice con la muestra absorbida se traspasó a un balón y se secó la acetona en un rotaevaporador. La muestra absorbida en el gel de sílice se colocó en la columna empacada, luego, se agregó aproximadamente 2 gramos de gel de sílice encima de la cabeza de columna y por último se colocó un pedazo de algodón. Como eluyentes se utilizaron mezclas de hexano (Hx) y acetato de etilo (AcOEt) en los gradientes que se indicarán para cada caso: Hx/AcOEt (1:1) hasta AcOEt 100% y Hx 100% hasta AcOEt 100%. La elución de la columna se realizó a presión. Cada fracción recolectada en erlenmeyer o tubo de ensayo, se concentró y se analizó por CCF, observando los cromatofolios bajo luz visible y luz ultravioleta a 254 nm. Se utilizó ácido fosfomolibdico (PMA) como reactivo revelador. Se reunieron las fracciones que tenían los mismos R_f según lo analizado por CCF. Los disolventes fueron evaporados a presión reducida. Las fracciones reunidas se guardaron en viales y se pesaron. Se controló la pureza del producto por CCF. Todos los productos fueron caracterizados por UPLC-MS y EM/EM.

Método B:

Se utilizó la técnica de purificación por solubilidad, para esto se redisolvió el crudo de reacción con MeCN. Se observó la formación de precipitado, este se filtró por succión

en un embudo con fita, se realizaron tres lavados del precipitado con más MeCN. Se obtuvieron un precipitado y un filtrado. Se siguió trabajando con el filtrado ya que, según la CCF, es allí donde se encontraba el producto. Se evaporó el acetonitrilo obteniéndose un crudo de reacción nuevamente. Se redissuelve el crudo en DCM y se realizaron tres lavados del crudo en H₂O, se seca el disolvente de la fase orgánica en un rotavaevaporador, se traspasó a un vial debidamente pesado, fue dejado en una cámara de vacío por 6 horas y por último se pesó el vial. Se realizó una CCF del producto. Se observó en una cámara UV a una longitud de onda de 254 nm. Se observó una sola mancha. Se reveló con PMA, observándose una sola mancha con el mismo R_f observado en la cámara UV. Se controla la pureza del producto por CCF. Todos los productos fueron caracterizados por FTIR-ATR, UPLC-MS y EM/EM.

Metodología general para la Síntesis de sales de fosfonio.



A una disolución en agitación de 4 equivalentes de trifenilfosfina (PPh₃) en dimetilformamida (DMF) se le añade 1 equivalente de 2-bromoetanol. La reacción se deja en agitación a una temperatura de 50 °C en un tubo de reacción a presión por 4 horas. Terminada la reacción, se deja la mezcla de reacción en frío durante 24 horas para precipitar la PPh₃, transcurrido este tiempo, se decanta el líquido sobrenadante, y se agrega más DMF al precipitado y nuevamente se deja en frío por otras 24 horas para garantizar que se ha extraído la mayor cantidad del producto. Este procedimiento se repite al menos tres veces. Se unifican todos los sobrenadantes obtenidos durante los decantados y lavados realizados. Se evapora la DMF a presión reducida, obteniéndose el crudo de reacción.

Metodología general para la purificación de sales de fosfonio.

Para la purificación de la sal de fosfonio se utilizó la técnica de cromatografía líquida al vacío (CLV) en fase normal (gel de sílice grado técnico, tamaño de poro 60 Å, con un tamaño de partícula de 230-400 mesh, 40-63 μm). La búsqueda de condiciones para

la purificación de los productos deseados se realizó por CCF. De esta manera se escogió la altura de la columna. El diámetro de la columna utilizado fue de 3.3 cm y una longitud de 6 cm. Para el empacado, se pesó el gel de sílice y se agregó a una columna de CLV hasta obtener la altura deseada. Para preparar la cabeza de columna, se pesó 4 gramos del gel de sílice en un vaso químico, el crudo de reacción se redisolvió en acetona, seguidamente se agregó gota a gota al gel de sílice en el vaso químico removiendo el gel de sílice con cuidado con una espátula hasta observar que todo el crudo de reacción se adsorbiera. Luego, el gel de sílice con la muestra absorbida se traspasó a un balón y se secó la acetona en un rotaevaporador. La muestra absorbida en el gel de sílice se colocó en la columna empacada, luego, se agregó 4 gramos de gel de sílice encima de la cabeza de columna y por último se colocó un pedazo de algodón. Como eluyentes se utilizaron Hx 100% y AcOEt 100%. Se recogieron las fracciones en matraces Cada fracción recolectada en erlenmeyer se concentró y se analizó por CCF que luego fueron observados bajo luz ultravioleta a 254 nm. Se utilizó PMA como reactivo revelador. Se reunieron las fracciones que tenían los mismos componentes por CCF. Se secaron los disolventes a presión reducida. Las fracciones reunidas se guardaron en viales y se pesaron. Se centró la pureza del producto por CCF. Todos los productos fueron caracterizados por UPLC-MS y EM/EM.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La elucidación de las estructuras de los compuestos cuya síntesis se ha descrito en puntos anteriores, fue realizadas por Espectrometría de Masas y Masas de Masas en un instrumento de UPLC-EM ubicado en los laboratorios de los Edificios Los Gemelos bajo la jurisdicción de la Vicerrectoría de Investigación y Postgrado (VIP) de la Universidad de Panamá, el cual está ubicado en el Laboratorio de Bioorgánica Tropical del Dr. Luis Cubilla Ríos.

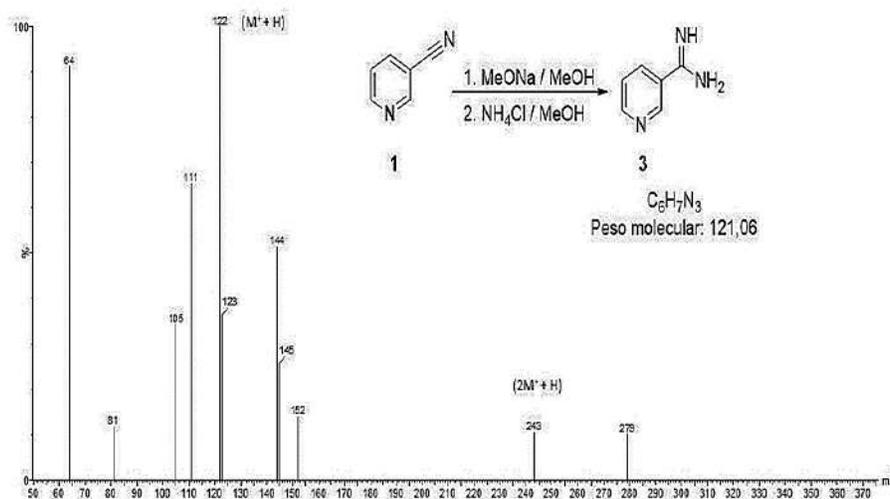
Síntesis y caracterización estructural del cloruro de amino(piridin-3-il) metaniminio (3).

Para la obtención del compuesto 3, se hizo reaccionar 764.7mg (7.3 mmol) del 3-pirincarbonitrilo comercial 1 con 793.9 mg (14.7 mmol) de MeONa a 50°C. Transcurrido 2 horas de reacción, se observó por CCF la formación del producto intermedio. Luego se añadió 232.2 mg (8.0 mmol) de NH₄Cl. La reacción se dejó en agitación continua por 40 horas a 50 °C. Pasado este tiempo, se tomó una muestra. Luego, se realizó un experimento de espectrometría de masas por inyección directa utilizando una ionización por electroespray (ESI) en modo positivo. En este experimento se logró observar el ion molecular con un $m/z = 122$ correspondiente al

(M+H) del compuesto 3. De igual manera, se logró observar los aductos como el ion $m/z = 144$ correspondiente al (M + Na) y el aducto con $m/z = 243$ correspondiente al dímero del producto protonado (2M+H) (Figura 1). Terminada la reacción, el producto fue purificado por precipitación en MeCN obteniéndose 868.7mg de producto como un sólido blanco y un rendimiento de 98%.

Figura 1.

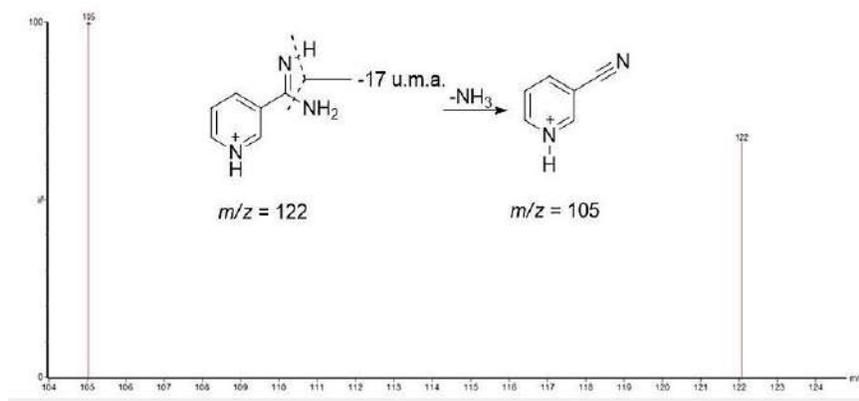
Espectro de Masas por ionización ESI⁺ del compuesto 3 obtenido por inyección directa.



Obtenido el compuesto puro, se procedió a realizar un experimento de Masas de Masas utilizando el ion molecular del compuesto 3, $m/z = 122$, como ion precursor para el análisis de fragmentación. Dicho análisis se realizó por inyección directa al espectrómetro y la fragmentación se realizó por ionización ESI⁺ utilizando una energía para la fragmentación de 25 V. En dicho análisis se observó nuevamente la aparición del ion molecular con $m/z = 122$ correspondiente al (M+H) del compuesto 3. A partir del ion precursor ion $m/z = 122$, por pérdida de masa de 17 u, se observó la formación del ion $m/z = 105$. La aparición de este ion se explica por la pérdida de una molécula de amoníaco (NH₃), siendo esta, una pérdida característica del grupo amidina tal y como se muestra en la figura 2.

Figura 2.

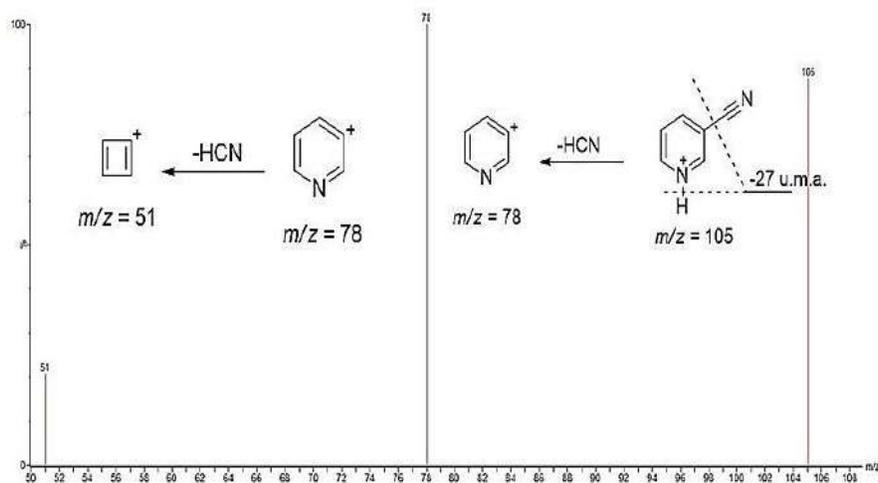
Fragmentación del ion precursor $m/z = 122$ para obtener el ion $m/z = 105$.



El ion m/z 105 es a su vez fragmentado y sufre una pérdida de masa de 27 u obteniéndose un ion con una $m/z = 78$. Está es una pérdida característica de compuestos con el grupo ciano (-CN). De igual forma, el fragmento $m/z = 78$ sufre un rearrreglo y fragmentación con pérdida de masa de 27 u . Dicha fragmentación es característica y única de los anillos de piridina, comprobándose así la estructura del compuesto 3 (Figura 3).

Figura 3.

Fragmentación del ion m/z 105 por pérdida de 27 u y rearrreglo del ion m/z 78 por pérdida de 27 u .

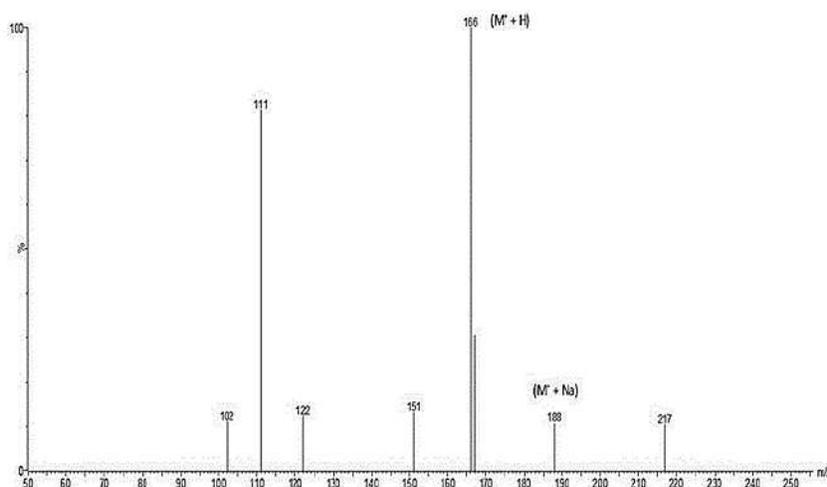


Síntesis y caracterización estructural del cloruro de amino(4-nitrofenil) metaniminio (4).

Para la obtención del compuesto 4, se hizo reaccionar 730.1 mg (4.9 mmol) del 4-nitrobenzocitrilo comercial 2 con 532.8 mg (9.9 mmol) de MeONa. La reacción se llevó a cabo a temperatura ambiente. Transcurrido 24 horas de reacción se observó la formación del producto intermedio por lo que se procedió a añadir 292.5 mg (5.4 mmol) de NH₄Cl. La reacción se dejó en agitación continua a temperatura ambiente por otras 24 horas. Luego, se realizó un experimento de espectrometría de masas por inyección directa utilizando una ionización por electroespray (ESI) en modo positivo. En este experimento se logró observar el ion molecular con $m/z = 166$ correspondiente al (M+H) del compuesto 4. De igual manera, se logró observar los aduptos $m/z = 188$ correspondiente al (M + Na) del compuesto 4 (Figura 4).

Figura 4.

Espectro de Masas por ionización ESI⁺ del compuesto 4 obtenido por inyección directa.



Terminada la reacción, el producto fue purificado por precipitación en MeCN obteniéndose 526.8 mg (53%) como un sólido color amarillo pálido. Para su elucidación estructural, el compuesto 4 fue sometido a un experimento de Masas de Masas utilizando el ion molecular del compuesto $m/z = 166$ como ion precursor para el análisis de fragmentación. Dicho análisis se realizó por inyección directa al espectrómetro y la fragmentación se realizó por ionización ESI⁺ utilizando una energía

para la fragmentación de 15 y 25 V. Distintas fragmentaciones se observaron cuando se varió la energía de ionización, lo que nos permitió una mejor caracterización de iones formados por la fragmentación del compuesto 4.

Para el análisis de fragmentación utilizando 15 V de energía, se logró observar el ion molecular con $m/z = 166$ correspondiente al $(M^+ + H)$ de compuesto 4. Este ion sufrió una pérdida de masas de 46 u correspondiente a la pérdida de un grupo nitro ($M^+ - NO_2$), observándose así el ion $m/z = 120$ (Figura 5). Un aumento de la energía de impacto a 20 V provocó la fragmentación del ion $m/z 120$ con pérdida de 17 u y se obtuvo el ion $m/z 103$ ($M^+ - NH_3$) correspondiente a la pérdida de una molécula de amoníaco (Figura 6). Otra forma de fragmentación que se observó fue la pérdida de masas de 17 u a partir del ion precursor $m/z 166$, observándose así el ion $m/z = 149$ ($M^+ - NH_3$) correspondiente a la pérdida de una molécula de amoníaco (Figura 7).

Figura 5.

Espectro de masas de masas para la fragmentación del compuesto 4 a 15 V.

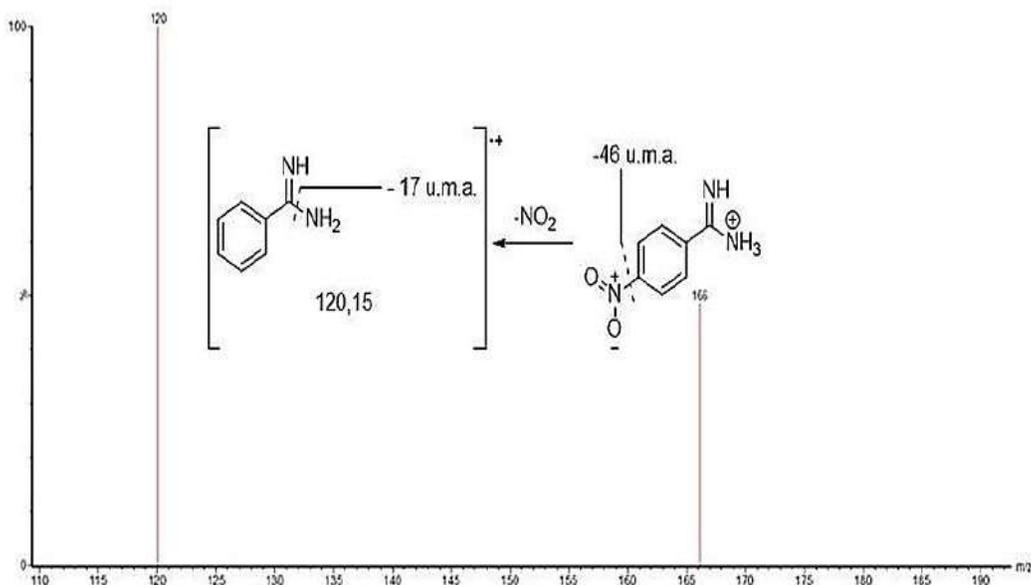


Figura 6.

Espectro de masas de masas para la fragmentación del compuesto 4 a 20 V.

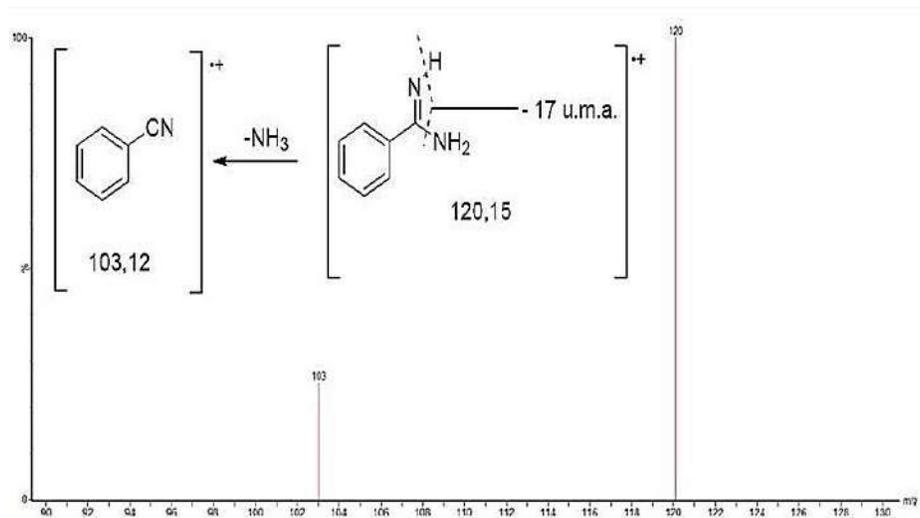
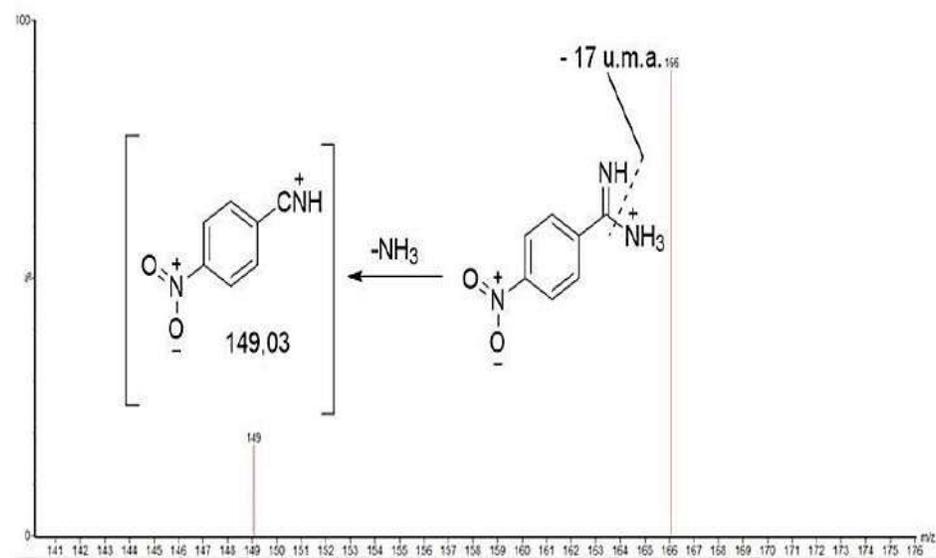


Figura 7.

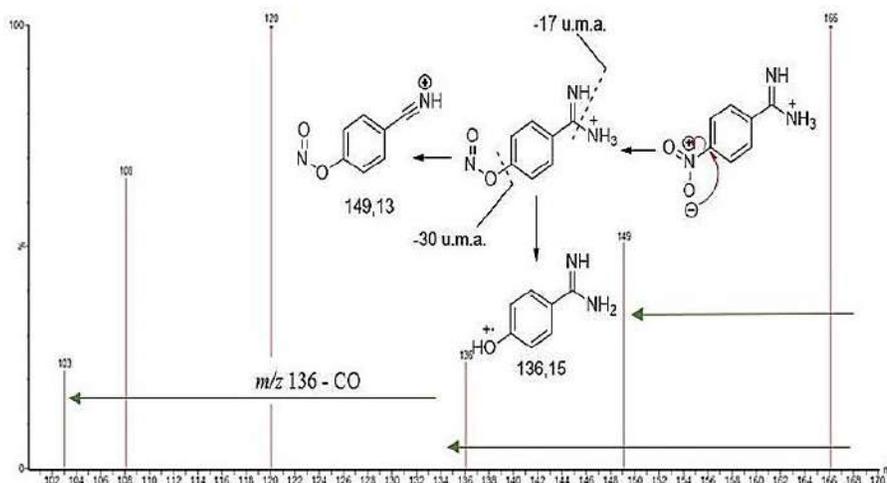
Espectro de masas de masas para la fragmentación del compuesto 4 a 20 V.



Los compuestos aromáticos nitrados poseen una fragmentación muy característica de la presencia del grupo nitro. A energías de impactos altas, el grupo nitro sufre un reagrupamiento de sus electrones enlazantes, seguido de una fragmentación con pérdida de masa de 30 u ($M^+ - NO$) característico de la salida de monóxido de nitrógeno (NO) que se observó por la aparición el ion con $m/z = 136$. El producto de esta fragmentación es un compuesto derivado de fenol, el cual, sufre una fragmentación con pérdida masa de 28 u correspondiente con la pérdida de una molécula de monóxido de carbono (CO) característico de compuesto fenólicos. Esta fragmentación se logró observar por la aparición del ion $m/z = 108$ (- CO) como se observa en la figura 8.

Figura 8.

Espectro de masas de masas para la fragmentación del compuesto 4 a 20 V.



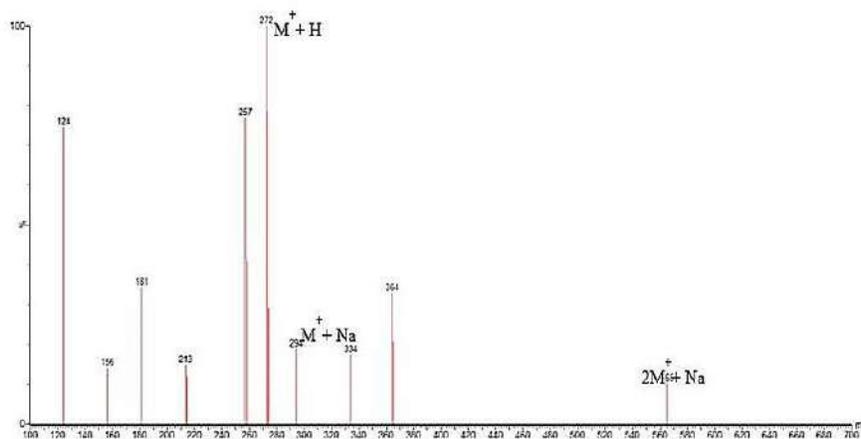
Síntesis y caracterización estructural de *N*-(4-metoxifenil)-4-nitrobenzimidamida (5).

Para la obtención del compuesto 5, se hizo reaccionar 109.7mg (7.4 mmol) del 4-nitrobenzonitrilo comercial con 78.0 mg (1.5 mmol) de NaOMe. La reacción se llevó a cabo a temperatura ambiente. Transcurrido 3 horas de reacción se observó la formación del producto intermediario. Luego se añadió 99.6 mg (1.1 mmol) de *p*-metoxianilina. La reacción se dejó en agitación continua a temperatura ambiente por otras 72 horas. Terminada la reacción, el producto fue purificado por CC como se describe en la metodología de purificación A, utilizando un gradiente de Hx 100% hasta AcOEt 100%, obteniéndose así 84.9 mg (42.5%) como un sólido amarillo. En un

segundo experimento y utilizando la metodología descrita en la parte experimental, se hizo reaccionar 109.7mg (7.4 mmol) del 4-nitrobenzonitrilo comercial con 78.0 mg (1.5mmol) de NaOMe. La reacción se llevó a cabo a temperatura ambiente. Transcurrido 48 horas de reacción se observó la formación del producto intermedio. Luego se añadió 99.6 mg (1.1 mmol) de *p*-metoxianilina. La reacción se dejó en agitación continua a temperatura ambiente por 14 días. Se agregó 78.4mg (0.74 mmol) de carbonato de sodio. Se dejó en agitación continua por 7 días. Se agregó 20 mg (0.37mmol) de NaOMe y 45.5mg (0.37mmol) de *p*-metoxianilina. La reacción se dejó en agitación continua por 7 días. Luego, se realizó un experimento de espectrometría de masas por inyección directa utilizando una ionización por electroespray (ESI) en modo positivo. En este experimento se logró observar el ion molecular con un $m/z = 272$ correspondiente al ($M^+ + H$) del compuesto **5**. De igual manera, se logró observar los aduptos $m/z = 294$ correspondiente al ($M^+ + Na$) y $m/z = 565$ correspondiente a la ($2M^+ + Na$) del compuesto **5** (Figura 9).

Figura 9.

Espectro de Masas por ionización ESI⁺ del compuesto 5 obtenido por inyección directa.

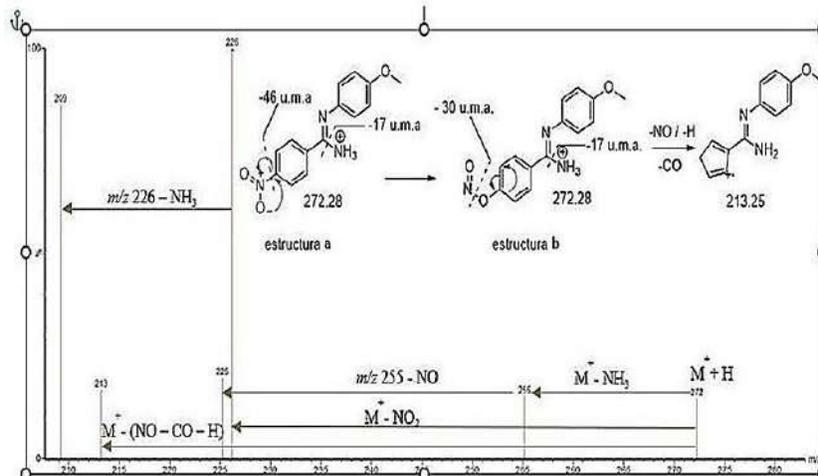


Verificado con el espectro de masas la formación del producto, este se purificó por CC, utilizando un gradiente de Hx/AcOEt (1:1) hasta AcOEt 100%, obteniéndose 93.3 mg (46.7%) como un sólido amarillo. El compuesto **5** fue sometido a un experimento de Masas de Masas utilizando el ion molecular $m/z = 272$ como ion precursor para el análisis de fragmentación. Dicho análisis se realizó por inyección directa al espectrómetro y la fragmentación se realizó por ionización ESI⁺ utilizando tres distintas energías para la

fragmentación (15, 20 y 25 V). Tomando en cuenta lo observado en las fragmentaciones de los compuestos 3 y 4 lo cuales son de estructuras similares, se realizó un análisis de los fragmentos obtenidos por espectrometría de masas de masas para el compuesto 5. De esta manera, logramos caracterizar de la siguiente manera. La energía de fragmentación que mejor información estructural proporcionó fue de 25 V. Cuando se impactó la molécula con 25 V, se observó ion molecular de 5 con $m/z = 272$ (estructura b, Figura 10). A esta energía de ionización, este ion, el compuesto 5 sufre un rearrreglo electrónico del grupo nitro, provocado la formación de un segundo ion $m/z = 272$ (estructura b, Fig. 10). A partir de ion $m/z = 272$, se obtiene el ion $m/z = 255$ correspondiente a la pérdida de una molécula de NH_3 (-17 u), siendo esta pérdida característica del grupo amidina. A partir de este ion ($m/z = 255$), por pérdida de NO (-30 u) se observó la aparición del ion $m/z = 225$. Se observó una segunda ruta de fragmentación para el compuesto 5, donde el ion molecular $m/z = 272$ por pérdida de un grupo NO_2 (-46 u) genera el ion $m/z = 226$. El ion $m/z = 226$ sufrió una fragmentación con pérdida de NH_3 (-17 u), una fragmentación característica del grupo amidina, dando así la formación del ion $m/z = 209$. Una tercera ruta de fragmentación del compuesto 5 fue observada nuevamente a partir del ion molecular $m/z = 272$. En esta fragmentación, el ion molecular sufrió un rearrreglo electrónico, seguido de una pérdida de NO (-30 u), seguidamente un segundo rearrreglo electrónico provocando la pérdida de CO (-28 u) y un protón, dando lugar a la aparición del ion $m/z = 213$ (Fig. 10).

Figura 10.

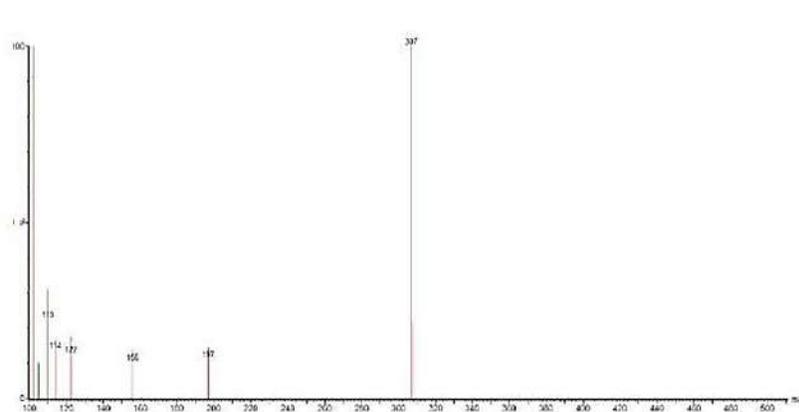
Espectro de masas de masas para la fragmentación del compuesto 5



A una disolución en agitación de 4 equivalentes de trifenilfosfina (PPh₃) en dimetilformamida (DMF), se le añadió 1 equivalente de 2-bromoetanol. La reacción se dejó en agitación a una temperatura de 50°C en un tubo de reacción a presión por 4 horas. Terminada la reacción, se dejó enfriar la reacción y esta se almacenó a 4 °C durante 24 horas. Transcurrido este tiempo se observó la precipitación de la PPh₃, por lo que, se decanta el disolvente, se añadió más DMF al precipitado y nuevamente se deja en frío por otras 24 horas hasta observar que no se formara más precipitado. Se unieron todos los sobrenadantes obtenidos durante los decantados y lavados realizados. Se evaporó la DMF a presión reducida, obteniéndose el crudo de reacción. El compuesto 8 fue entonces purificado por cromatografía líquida al vacío utilizando como eluyentes hexano y AcOEt, obteniéndose así, 96.8 mg del producto 8 como un líquido aceitoso de color amarillo. Luego, se realizó un experimento de espectrometría de masas por inyección directa utilizando una ionización por electroespray (ESI) en modo positivo. En este experimento se logró observar el ion molecular con un $m/z = 371$ correspondiente directamente al peso molecular del compuesto 8 debido a su característica catiónica (Figura 11).

Figura 11.

Espectro de masas de la reacción para la obtención del compuesto 8.



Una vez purificado el compuesto 8, se procedió a realizar un experimento de espectrometría de masas para caracterizar la estructura del compuesto. Dicho análisis se realizó por inyección directa al espectrómetro y la fragmentación se realizó por ionización ESI⁺ utilizando cuatro distintas energías para la fragmentación de 15, 20, 25 y 30 V. De esta manera, comprobamos que para el compuesto 8, la energía de fragmentación que mejor información estructural proporciona fue de 30 V. En el

espectro de fragmentación del compuesto 8, podemos observar dos tipos de fragmentación. La primera de ellas es la fragmentación por pérdida de iones oxonio, característicos de los alcoholes alifáticos. A partir del ion molecular $m/z = 307$ (esquema 1), por pérdida de 31 u correspondiente a la pérdida del ion metilenoxonio (CH_3O^+) y ganancia de un protón, se observa la aparición del ion $m/z = 277$. También, se observó la aparición del ion $m/z = 262$ el cual representa una pérdida de 45 u a partir del ion molecular $m/z = 307$, lo que corresponde a la formación del ion etilenoxonio ($\text{C}_2\text{H}_5\text{O}^+$). También se observa esta misma fragmentación con ganancia de un protón dando la aparición del ion $m/z = 263$, tal como se muestra en las figuras 12 y 13.

Figura 12.

Fragmentación del compuesto 8 con formación de iones oxonios.

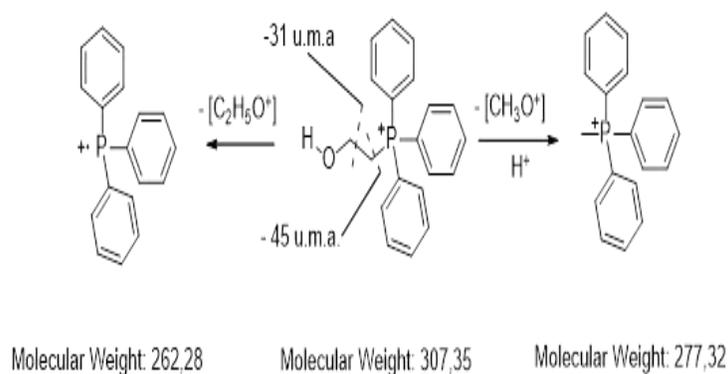
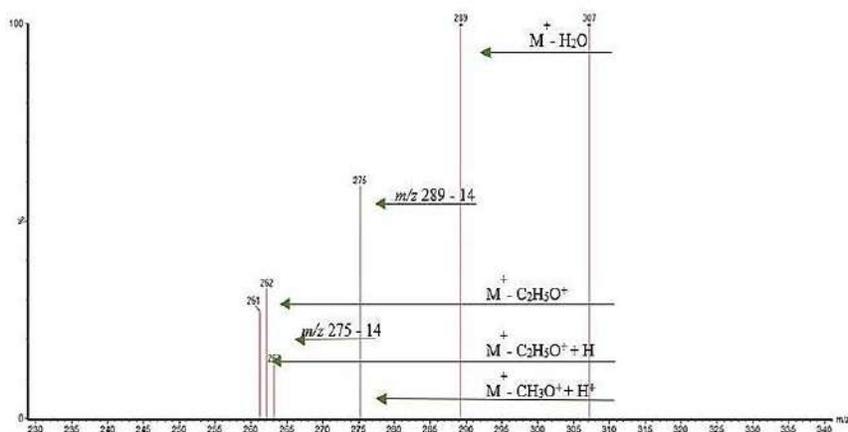


Figura 13.

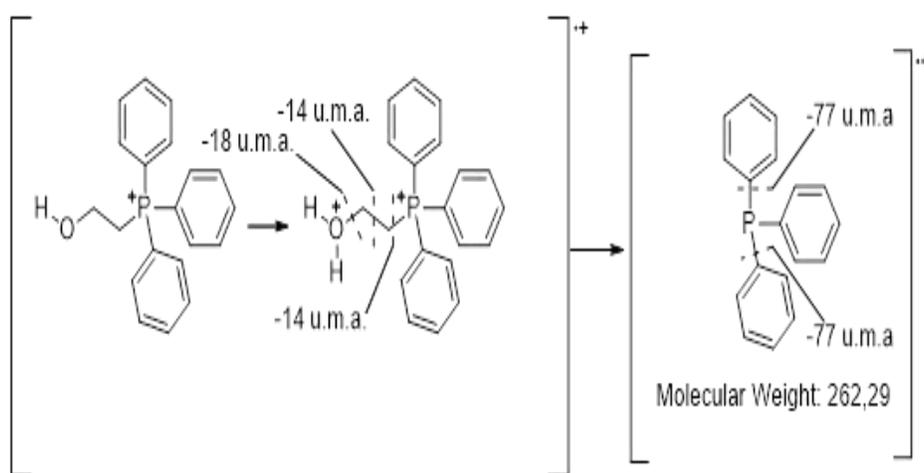
Espectros de masas de masas del compuesto 8. Fragmentación heterolítica de la serie del oxígeno para alcoholes primarios.



Un segundo tipo de fragmentación característicos de los alcoholes primarios es la ruptura heterolítica de la serie del oxígeno. Esta fragmentación inicia con la pérdida de una molécula de H₂O que se observa con la aparición del ion $m/z = 289$. Seguido a la pérdida de una molécula de H₂O, se dan sucesivas pérdidas de 14 u correspondientes a los metilenos (-CH₂-) presentes en el alcohol primario, tal y como se muestra en la figura 14.

Figura 14.

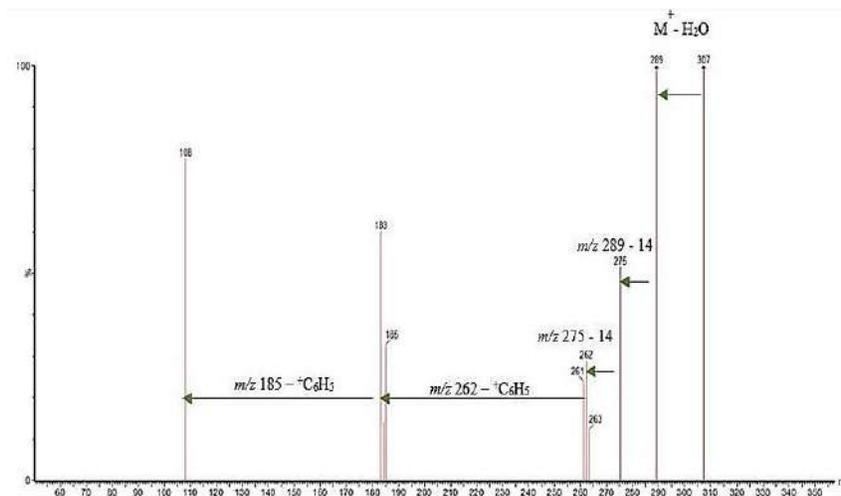
Fragmentación por ruptura heterolítica de la serie del oxígeno.



Esta fragmentación da como resultado la aparición del ion $m/z = 275$ para la pérdida del primer metileno y luego la aparición del ion $m/z = 261$ por pérdida del segundo metileno y formación de PPh₃. También fue posible observar la pérdida de un grupo fenilo (-77 u) a partir del ion $m/z 262$ generando el ion $m/z 185$ que, a su vez, por pérdida de un segundo grupo fenilo generó el ion $m/z 108$, tal como se muestra en la figura 15.

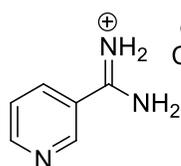
Figura 15.

Espectros de masas de masas del compuesto 8. Rupturas heterolíticas de la serie del oxígeno para alcoholes primarios.



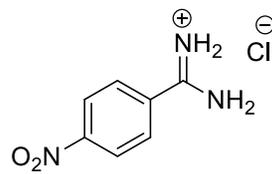
DATOS EXPERIMENTALES DE LOS COMPUESTOS.

Síntesis de cloruro de amino(piridin-3-il) metaniminio (3):



Utilizando la metodología general, se obtuvo 868.7mg (98%) como un sólido blanco. **EM-ESI⁺ (10v):** m/z 122 (M+H), m/z 144 (M+Na), m/z 243 (2M+H). **EM-EM-ESI⁺ (25v):** m/z 105 (M-NH₃), m/z 78 (m/z 105 - HCN), m/z 51 (m/z 78 - HCN).

Síntesis del cloruro de amino(4-nitrofenil) metaniminio (4):



Utilizando la metodología general, se obtuvo 526.8mg (53%) como un sólido color amarillo pálido. **EM-ESI⁺ (10v):** m/z 166 (M+H), m/z 188 (M+Na). **EM-EM-ESI⁺ (15v):** m/z 166 (M+H), m/z 149 (M-NH₃), m/z 136 (M-NO), m/z 120 (M-NO₂), m/z 108 (m/z 136-CO), m/z 103 (m/z 120-NH₃), m/z 93 (m/z 108-NH₃).

Síntesis de N-(4-metoxifenil)-4-nitrobencimidamida (5): Utilizando la metodología general, se obtuvo 93.3 mg (46.7%) como un sólido amarillo. **EM-ESI⁺ (10v):** m/z 272 (M+H), m/z 294 (M+Na), m/z 565 (2M+Na). **EM-EM-ESI⁺ (25v):** m/z 272 (M+H),

m/z 257 (M-CH₃), *m/z* 255 (M-NH₃), *m/z* 242 (M-NO), *m/z* 240 (*m/z* 257-NH₃), *m/z* 226 (M-NO₂), *m/z* 225 (*m/z* 255-NO), *m/z* 214 (*m/z* 242-CO), *m/z* 213 (M-NO-CO-H), *m/z* 211 (*m/z* 242-CH₃O), *m/z* 210 (*m/z* 240-NO), *m/z* 208 (*m/z* 255-OH). **EM-EM-ESI⁺ (30v)**: *m/z* 199 (*m/z* 214-CH₃), *m/z* 198 (*m/z* 213-CH₃), *m/z* 197 (*m/z* 214-NH₃), *m/z* 196 (*m/z* 213-NH₃), *m/z* 183 (*m/z* 214-CH₃O), *m/z* 182 (*m/z* 213-CH₃O), *m/z* 178 (*m/z* 209-CH₃O), *m/z* 149 (*m/z* 226-⁺C₆H₅), *m/z* 124 (M-⁺C₇H₉NO), *m/z* 109 (*m/z* 124-CH₃), *m/z* 93 (*m/z* 124-CH₃O), *m/z* 77 (⁺C₆H₅).

Síntesis de N-(4-metoxifenil) nicotinimidamida (6): Utilizando la metodología general, se obtuvo 689 mg (40.2%) como un aceite colormarrón oscuro. **EM-ESI⁺ (10v)**: *m/z* 228 (M+H), *m/z* 250 (M+Na), *m/z* 477 (2M+Na). **EM-ESI⁻ (10v)**: *m/z* 226 (M-H). **EM-EM-ESI⁺ (25v)**: *m/z* 228 (M+H), *m/z* 213 (M-CH₃), *m/z* 211 (M-NH₃), *m/z* 196 (*m/z* 211-CH₃), *m/z* 124 (M-⁺C₇H₉NO), *m/z* 109 (*m/z* 124-CH₃), *m/z* 107 (*m/z* 124-NH₃), *m/z* 93 (*m/z* 124-CH₃O), *m/z* 77 (⁺C₆H₅).

Síntesis de Bromuro de (2-hidroxietyl) trifenilfosfonio (8). Utilizando la metodología general, se obtuvo 96.8mg (9.7%) como un aceite color amarillo. **EM-ESI⁺ (10v)**: *m/z* 307 (M⁺). **EM-EM-ESI⁺ (25v)**: *m/z* 307 (M⁺), *m/z* 289 (M-H₂O), *m/z* 277 (M+H-CH₃O⁺), *m/z* 275 (*m/z* 289-CH₂), *m/z* 263 (M+H-C₂H₅O⁺), *m/z* 262 (M-C₂H₅O⁺), *m/z* 261 (*m/z* 275-CH₂), *m/z* 185 (*m/z* 262-⁺C₆H₅), *m/z* 108 (*m/z* 185-⁺C₆H₅).

CONCLUSIONES

En este trabajo de investigación, se logró la síntesis de 5 compuestos con propiedades catiónicas, dos compuestos derivados de amidinas no sustituidas (3 y 4), dos compuestos derivados de amidinas *N*-sustituidas (5 y 6) y un compuesto derivado de sales de fosfonio (8). Todos los compuestos sintetizados en nuestro laboratorio fueron purificados con éxito utilizando técnicas de precipitación o por cromatografía en columnas, obteniéndose rendimientos de reacción desde moderados hasta buenos. En ausencia de un espectrómetro de RMN en Panamá, hemos realizado la total elucidación de las estructuras de todos productos obtenidos utilizando la técnica de Espectrometría de Masas de Masas, adicional a esto, la espectrometría de masas nos permitió analizar los mecanismos de fragmentación característicos de los compuestos sintetizados en nuestro laboratorio.

AGRADECIMIENTOS

A la Secretaría Nacional de Ciencias, Tecnología e Innovación (SENACYT) y al Sistema Nacional de Investigaciones (SNI) por la financiación de este proyecto. A la Dra. Noelle Beckmann de la Universidad Estatal de Utah, por la beca proporcionada a

la estudiante de tesis, María Bocanegra. A la Vicerrectoría de Investigación y Postgrado (VIP) de la Universidad de Panamá, por el espacio de los laboratorios y por la utilización del UPLC-EM localizado en el Laboratorio de Bioorgánica Tropical. Especial agradecimiento Dr. Luis Cubilla y al Profesor Daniel Torres por la ayuda proporcionada para la elaboración de este proyecto.

REFERENCIAS

- Fang, X., Xie, J., Chu, S., Jiang, Y., An, Y., Li, C., Gong, X., Zhai, R., Huang, Z., Qiu, C. & Dai, X. (2021) 'Quadrupole-linear ion trap tandem mass spectrometry system for clinical biomarker analysis', *Engineering*. Chinese Academy of Engineering. doi: 10.1016/j.eng.2020.10.021.
- Glish, G. L. & Burinsky, D. J. (2008) 'Hybrid Mass Spectrometers for Tandem Mass Spectrometry', *Journal of the American Society for Mass Spectrometry*, 19(2), pp. 161–172. doi: 10.1016/j.jasms.2007.11.013.
- De Hoffmann, E. (1996) 'Tandem mass spectrometry: A primer', *Journal of Mass Spectrometry*, 31(2), pp. 129–137. doi: 10.1002/(SICI)1096-9888(199602)31:2<129::AID-JMS305>3.0.CO;2-T.
- Patai, S. (2010) *The chemistry of amidines and imidates, The Chemistry of Amidines and Imidates*. Edited by S. Patai. Chichester, UK: John Wiley & Sons, Ltd. doi: 10.1002/9780470771495.
- Schaefer, F. C. & Peters, G. A. (1961) 'Base-Catalyzed Reaction of Nitriles with Alcohols. A Convenient Route to Imidates and Amidine Salts', *The Journal of Organic Chemistry*. American Chemical Society, 26(2), pp. 412–418. doi: 10.1021/jo01061a034.
- Xiao, H. M., Yang, X., Zheng, F., Tshepelevitsh, S., Wang, X., Yao, X. J., Leito, I. & Feng, Y. Q. (2021) 'Quantitative analysis of the relationship of derivatization reagents and detection sensitivity of electrospray ionization-triple quadrupole tandem mass spectrometry: Hydrazines as prototypes', *Analytica Chimica Acta*. Elsevier Ltd, 1158, p. 338402. doi: 10.1016/j.aca.2021.338402.
- Yost, R. A. & Fetterolf, D. D. (1983) 'Tandem mass spectrometry (MS/MS) instrumentation', *Mass Spectrometry Reviews*, 2(1), 1–45. doi: 10.1002/mas.1280020102.