

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.camcho@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 Stapf

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

Dr. Josep Batlló Ortiz

Institut Cartografic I Geologic, Barcelona Catalunya, España

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

Dr. Bruno Zachrisson

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

bruno.zachrissons@idiap.gob.pa

<https://orcid.org/0000-0002-8219-7438>

Dr. Luis Wong Vega

Vicerrectoría de Investigación y Postgrado, Panamá luis.wongv@up.ac.pa /luis.wong.vega@gmail.com <https://orcid.org/0000-0003-0139-6134>

Dr. Fernando Gómez Merino

Colegio de Postgraduados, México

fernandg@colpos.mx

Dr. Edgardo Castro

Universidad de Panamá, Facultad de Ciencias Naturales, Exactas y Tecnología, Depto. de Genética y Biología Molecular, Panamá
edgardo.castro@up.ac.pa <https://orcid.org/0000-0003-4884-9479>

Comité de diagramación, estilo y producción

Dr. Eduardo Camacho Astigarrabia

Universidad de Panamá - Editor Jefe

Michelle Ferrín

Universidad de Panamá - Secretarías

Lic. Samuel Rodríguez - Universidad de Panamá - Técnico

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.

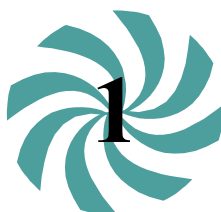
Secretaría General

José de la Montaña López

Decano de la Facultad de Ciencias Naturales, Exactas y Tecnología

Índice

Título	Página
DIVERSIDAD DE CALLIPHORIDAE RECOLECTADAS EN DIFERENTES TEJIDOS HÍGADO Y CORAZÓN DE CERDOS DOMÉSTICOS (<i>Sus scrofa</i>), COMO INDICADOR FORENSE EN ÁREAS BOSCOSAS CONTRASTANTES, EN PANAMÀ	5-25
EUGLOSSINI BEES (HYMENOPTERA: APIDAE) IN SANTA RITA, PANAMA	26-40
ABUNDANCIA Y DIVERSIDAD DE AVES PLAYERAS EN LA PLAYA EL AGALLITO, DISTRITO DE CHITRÉ, PROVINCIA DE HERRERA	41-62
CARACTERÍSTICAS DE LA ANIDACIÓN DE TORTUGAS MARINAS: <i>Lepidochelys olivacea</i> y <i>Chelonia mydas</i> , EN PLAYA LAGARTO, LOS SANTOS, PANAMÁ	63-88
ESTUDIO COMPARATIVO DEL MODELO DE LA ATMÓSFERA ESTÁNDAR APLICADO AL CASO PARTICULAR DE LA TROPÓSFERA EN LA REGIÓN DE EL CERRO, LAS TABLAS, PANAMÁ	89-105
RESTAURACIÓN CON MANGLE PIÑUELO (<i>Pelliciera rhizophorae</i> Triana & Planch) DE ÁREAS ALTERADAS EN EL BOSQUE INUNDABLE DE MANGLAR EN UNA REGIÓN DEL PACIFICO.	106-120
MULTIPARASITISMO EN LARVAS DE <i>Hypercompe muzina</i> (LEPIDOPTERA: EREBIDAE)	121-131
SINGLE MOLECULE MAGNETS: TOWARDS TECHNOLOGICAL APPLICATIONS	132-179
RADIO ASTRONOMY RESEARCH: MASERS AS TRACERS OF ANGULAR MOMENTUM IN MOLECULAR OUTFLOWS PROSPECCIÓN	180-192
LA FUNCIÓN DE CANTOR	193-208
CARACTERIZACIÓN GEOMORFOLÓGICA, FLORISTICA Y ESTRUCTURAL DEL MANGLAR EN LA COSTA DE PIXVAE, GOLFO DE CHIRIQUÍ, PACÍFICO DE PANAMÁ	209-229



Tecnociencia, Vol. 25, N°1: 5-25

Enero-Junio 2023

ISS L 2415-0940

DIVERSIDAD DE CALLIPHORIDAE RECOLECTADAS EN DIFERENTES TEJIDOS HÍGADO Y CORAZÓN DE CERDOS DOMÉSTICOS (*Sus scrofa*), COMO INDICADOR FORENSE EN ÁREAS BOSCOSAS CONTRASTANTES, EN PANAMÀ

Percis A. Garcés¹, Meybis Medina¹ Litza N, Arias².

¹Universidad de Panamá, Vicerrectoría de Investigación y Postgrado, Programa Centroamericano de Maestría en Entomología/FACINE y T, Dpto. Zoología, Panamá.

perchysg@gmail.com  meibysmedina09@gmail.com 

²Ministerio de Educación, Panamá. nadily10@gmail.com 

Fecha de recepción: 11 de mayo de 2022

Fecha de aceptación: 11 de octubre de 2022

RESUMEN

Se estudiaron las Calliphoridae en dos áreas: un área intervenida y una boscosa, con el propósito de conocer las principales especies del área, que pudieran servir como indicadoras forense. Para la captura de moscas se emplearon dos tejidos de cerdo (hígado y corazón). Los mismos fueron expuestos a intervalos de 12, 24, 48, 72 y 96 horas de descomposición. Se capturaron 1286 especímenes que representaron el 54.3% de las capturas, los cuales tuvieron distribuidos en seis géneros y en nueve especies, las más abundantes fueron *Chrysomya megacephala* (Fabricius, 1794), con 680 especímenes; *Chloroprocta idioidea* (Robineau-Desvoidy, 1830), con 311 especímenes, *Hemilucilia segmentaria* (Fabricius, 1805), con 116 especímenes; *Cochlyomyia macellaria* (Fabricius, 1775), con 57 especímenes, *Chrysomya rufifacies* (Macquart, 1843), 43 ejemplares; *Mesembrinella bicolor* (Fabricius, 1893), con 40 especímenes; *Paralucilia pseudolyrcea* (Mello, 1969); con 20 especímenes y *Paralucilia paraensis* (Mello, 1969), con 17.

PALABRAS CLAVES

Calliphoridae, descomposición, diversidad, hábitats, sustratos.

DIVERSITY OF CALLIPHORIDAE COLLECTED IN DIFFERENT LIVER AND HEART TISSUES OF DOMESTIC PIGS (*Sus scrofa*), AS A FORENSIC INDICATOR IN CONTRASTING FOREST AREAS IN PANAMA.

ABSTRACT

Calliphoridae flies were studied in two areas: an intervened area and forested area, with the purpose of knowing the main species of the area, which could serve as forensic indicators. Two pig tissues (liver and heart) were used to capture flies. They were exposed at intervals of 12, 24, 48, 72 and 96 hours of decomposition. 1286 specimens were captured, which represented 54.3% of captures, which were distributed in six genera and nine species, the most abundant were *Chrysomya megacephala* (Fabricius, 1794), with 680 specimens, *Chloroprocta idioidea* (Robineau-Desvoidy, 1830), with 311 specimens; *Hemilucilia segmentaria* (Fabricius, 1805), with 116 specimens; *Cochliomyia macellaria* (Fabricius, 1775), with 57 specimens; *Chrysomya rufifacies* (Macquart, 1843), with 43 specimens; *Mesembrinella bicolor* (Fabricius, 1893), with 40 specimens; *Paralucilia pseudolyrcea* (Mello, 1969), with 40 specimens and *Paralucilia paraensis* (Mello, 1969), with 17.

KEY WORDS

Calliphoridae, decomposition, diversity, hábitats, substrates.

INTRODUCCIÓN

La entomología forense es la ciencia que analiza el uso de artrópodos como evidencia en investigaciones legales de muertes ([Amendt et al. 2010](#)). Su utilidad se basa en el hecho que los artrópodos colonizan cadáveres frescos rápidamente, utilizándolos como recurso alimenticio en forma secuencial haciendo que la descomposición cadavérica sea un proceso predecible (Byrd & Castner, 2001).

El conocimiento de la descomposición de la fauna necrófaga es la base de la entomología forense, el cual contribuye a la comprensión de la distribución temporal y el comportamiento de las especies que son activas en la descomposición de un cadáver humano o de un animal (Catts & Haskell, 1990; Byrd & Catner, 2001).

Las especies de insectos involucradas, permite conocer la fase de arribo cada una de ellas, el tiempo que usan el cadáver, y como lo hacen el

tiempo que permanecen en este. Además, permite esclarecer los posibles causas o circunstancias de la muerte o establecer si un cadáver ha sido traslado de uno sitio a otro (Byrd & Castner, 2001). La secuencia del arribo de los insectos depende tanto de las condiciones ambientales, como de la composición de la fauna local (Catts & Goff, 1992).

Entre los insectos que constituyen una porción importante de la fauna cadavérica se encuentran las moscas de la familia Calliphoridae. Las cuales tienden a ser las primeras en colonizar y utilizar un cadáver y participar activamente en el proceso de descomposición (Wolff *et al.* 2001).

Algunos estudios forenses realizados en Panamá incluyen los Bermúdez (2007), quien reportó 26 especies de Calliphoridae. Garcés *et al.* (2004) estudió la fauna asociada a cadáveres de cerdos domésticos en el Puerto de Vacamonte. Buitrago *et al.* (2012), reportó la diversidad de Calliphoridae, empleando vísceras de pescados. Garcés & Rosas (2016), compararon las poblaciones de moscas necrófagas en la provincia de Panamá y en Chiriquí empleando hígados humanos en estado enfisematoso. Garcés & Molinar (2020), estudiaron las Calliphoridae asociadas a tres cebos de cerdos domésticos. Garcés *et al.* (2021) compararon la atracción de las principales especies necrófagas en diversos hígados humanos en diversos expuestos estados de descomposición.

Los objetivos del estudio fueron: 1) Comparar la sucesión de las principales especies de Calliphoridae que son atraídas a los tejidos de cerdo doméstico (hígado y corazón), en intervalos de 12, 24, 48, 72 y 96 horas de exposición y, 2) comparar las especies que están presentes en un área boscosa y en un área intervenida del Parque Nacional Soberanía (PNS).

MÉTODOS Y MATERIALES

Área de estudio

El estudio se realizó en los predios boscosos del PNS (9° 04' 27" N y 79° 39' 35" O), ciudad de Panamá entre las provincias de Panamá y Colón. Los predios comprenden alrededor de 22 104 hectáreas de bosque tropical, y presentan una temperatura promedio de 25°C, una

precipitación anual promedio de 2131 mm por año y una humedad relativa de aproximadamente 80% (ANAM, 2010).

Para la captura de moscas se emplearon como biomodelos dos tejidos de cerdo hígado y corazón a 12h de su extracción aproximadamente. Se cortaron en fragmentos de 200g de hígado y 110g de corazón, atendiendo a los tamaños de los órganos. Cada tejido se colocó en sus respectivos envases plásticos, cerrados y debidamente rotulados, los mismos estuvieron expuestos en el área boscosa y en el área intervenida, donde se registró la temperatura ambiental y la de los tejidos, empleando la metodología de Pineda (2011).

Los tejidos fueron expuestos a intervalos de 12, 24, 48, 72 y 96h de descomposición. Cada muestreo fue realizado durante tres (3) horas continuas en horario de 9:00 am a 12:00 md. Transcurridos el primer tiempo de las primeras 12 h de colecta, se continuó con los subsiguientes tejidos, hasta completar la exposición de las 96h. Simultáneamente, se hicieron las capturas de moscas con la ayuda de una red entomológica, por intervalo de horas.

Los muestreos iniciaron tratando de que coincidieran con el del estado fresco del tejido. Los tejidos se dejaron descomponer hasta alcanzar los estados enfisematoso y colicuativo.

Las primeras colectas de moscas se realizaron en intervalos de 10 minutos, hasta completar la primera hora de muestreo. La segunda hora de muestro, se realizó a intervalos de 15 minutos, hasta completar la segunda hora y, finalmente la tercera hora de muestreo, se realizó a intervalos de 20 minutos. Los especímenes adultos colectados fueron preservaron en alcohol al 75%, los cuales fueron trasladados al Edificio del Programa Centroamericano de la Maestría en Entomología, de la Universidad de Panamá.

Identificación de especímenes

Los especímenes capturados fueron montados en alfileres y depositados en cajas entomológicas (fueron curadas con alcanfor), para su debida identificación, se observaron las características morfológicas macroscópicas de los especímenes adultos, utilizando un estereoscopio.

La identificación de los especímenes se empleó las claves taxonómicas de Flórez & Wolff, (2009).

RESULTADOS

Se obtuvo la captura de 1,286 especímenes de moscas, distribuidos en seis géneros y nueve especies. Las especies *Chrysomya megacephala* y *Chloroprocta idioidea* fueron las más capturadas con 680 y 311 especímenes respectivamente, lo que corresponde al 52.8% y 24.1%, de las capturas (Fig. 1).

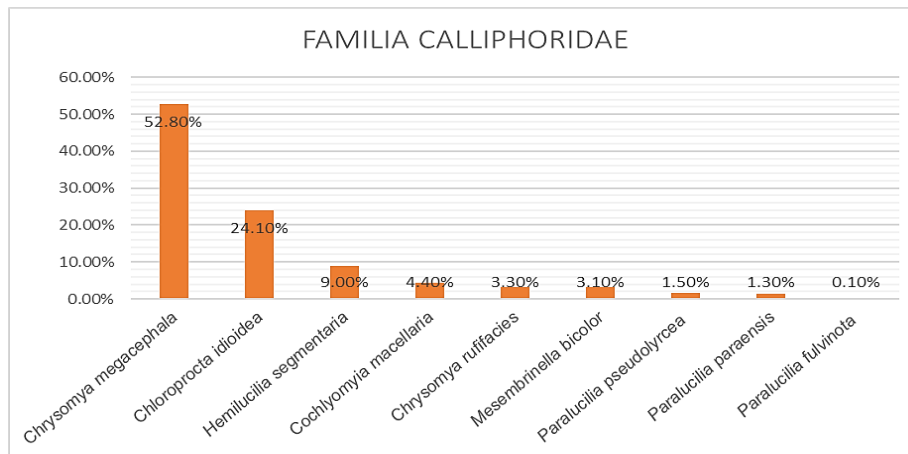


Fig. 1. Porcentajes de Capturas por especie de la familia Calliphoridae

La comparación entre las áreas registró que el área intervenida hubo 850 capturas y en la boscosa 436. Las especies más abundantes fueron *Chrysomya megacephala* y *Chloroprocta idioidea* con 518 y 207 especímenes respectivamente. Mientras que, en el área boscosa, fueron *Chrysomya megacephala* y *Chloroprocta idioidea* con 162 y 104 especímenes, respectivamente (Cuadro 1).

Cuadro 1. Comparación de especies capturadas en área boscosa e intervenida del Parque Nacional Soberanía (PNS)

Especies	Área Boscosa	(%)	Área intervenida	(%)	Total
Calliphoridae					
<i>Chrysomya megacephala</i>	162	37,1	518	60,9	680
<i>Chloroprocta idioidea</i>	104	23,8	207	24,3	311
<i>Hemilucilia segmentaria</i>	82	18,8	34	4	116
<i>Mesembrinella bicolor</i>	37	8,4	3	0,3	40
<i>Chrysomya rufifacies</i>	19	4,3	24	2,8	43
<i>Cochliomyia macellaria</i>	14	3,2	43	5,1	57
<i>Paralucilia pseudolyrcea</i>	9	2,0	11	1,2	20
<i>Paralucilia paraensis</i>	8	1,8	9	1,0	17
<i>Paralucilia fulvincta</i>	1	0,2	1	0,1	2
Total	436	100	850	100	1 286

La comparación de los tejidos reportó que en el hígado se capturó 890 especímenes, lo que representó el 69.2%, mientras que el corazón se capturó 396 especímenes, que representó el 51.4% de las capturas (Cuadro 2).

Cuadro 2. Comparación de las especies capturadas en los tejidos (Hígado y Corazón).

Especies	Corazón	Abundancia relativa %	Hígado	Abundancia relativa %	Total
Calliphoridae					
<i>Chrysomya megacephala</i>	222	56,6	458	51,4	680
<i>Chloroprocta idioidea</i>	92	23,2	219	24,6	313
<i>Hemilucilia segmentaria</i>	23	5,8	93	10,4	116
<i>Cochliomyia macellaria</i>	19	4,7	38	4,2	57
<i>Mesembrinella bicolor</i>	15	3,7	25	2,8	40
<i>Chrysomya rufifacies</i>	10	2,5	33	3,7	43
<i>Paralucilia paraensis</i>	9	2,2	8	0,8	17
<i>Paralucilia pseudolyrcea</i>	6	1,5	14	1,5	20
<i>Paralucilia fulvincta</i>	0	0,0	2	0,2	2
Total	396	100	890	100	1286

En las primeras 12 horas de exposición de los tejidos, las primeras moscas que arribaron, a los 10 minutos, fueron *Chrysomya rufifacies* y

Mesembrinella bicolor con un ejemplar cada una. Mientras que, en la segunda hora, las especies que arribaron, a los 15 minutos, fueron *Chrysomya megacephala* y *Chrysomya rufifacies* con un ejemplar cada uno (Cuadro 3).

Cuadro 3. Total, de especies capturadas a las 12 horas de exposición en el parque nacional soberanía (PNS).

ESPECIES DE MOSCAS	PRIMERA HORA (MIN)						TOTAL	SEGUNDA HORA (MIN)				TOTAL	TERCERA HORA (MIN)			TOTAL
	10	20	30	40	50	#		15	30	45	60		20	40	60	
	Calliphoridae															
<i>Chrysomya megacephala</i>	0	0	1	0	0	1	2	1	1	0	1	3	1	0	1	2
<i>Chrysomya rufifacies</i>	1	0	0	0	0	0	1	1	0	0	1	2	0	0	0	0
<i>Mesembrinella bicolor</i>	1	0	1	0	0	0	2	0	1	0	0	1	0	1	0	1
TOTALES							5					6				3
																14

A las 24 horas de descomposición de los tejidos, se capturaron 74 especímenes, distribuidos en diez especies y en dos familias. La mayor captura de moscas correspondió a las especies *Chrysomya megacephala* y *Chloroprocta idioidea*, con 31 y 15 especímenes (Cuadro 4).

Cuadro 4. Total, de especies capturadas a las 24 horas de exposición en el parque nacional soberanía (PNS).

ESPECIES DE MOSCAS	PRIMERA HORA (MIN)						TOTAL	SEGUNDA HORA (MIN)				TOTAL	TERCERA HORA (MIN)			TOTAL
	10	20	30	40	50	#		15	30	45	60		20	40	60	
	Calliphoridae															
<i>Chrysomya megacephala</i>	0	2	1	0	2	1	6	3	1	15	2	21	0	2	2	4
<i>Chloroprocta idioidea</i>	2	1	1	1	1	4	10	0	0	2	2	4	0	1	0	1
<i>Hemilucilia segmentaria</i>	0	1	0	0	0	1	2	1	0	3	5	9	0	1	1	2
<i>Mesembrinella bicolor</i>	1	1	0	1	0	0	3	3	1	0	0	4	1	0	1	2
<i>Paralucilia paraensis</i>	2	0	0	0	1	0	3	0	0	1	0	1	0	0	0	0
<i>Paralucilia pseudolyrcea</i>	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<i>Paralucilia fulvinota</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0
Totales							25					40				9

A las 48 horas de exposición, se capturaron un total de 250 especímenes, distribuidos ocho especies. Las mayores capturas correspondieron a la especie *Chrysomya megacephala* y *Chloroprocta idioidea*, con 168 y 118 especímenes (Cuadro 5).

Cuadro 5. Total, de especies capturadas a las 48 horas de exposición en el parque nacional soberanía (PNS).

ESPECIES DE MOSCAS	PRIMERA HORA (MIN)						TOTAL	SEGUNDA HORA (MIN)				TOTAL	TERCERA HORA (MIN)			TOTAL
	10	20	30	40	50	#		15	30	45	60		20	40	60	
	Calliphoridae															
<i>Chrysomya megacephala</i>	7	2	8	6	21	#	85	35	24	12	8	79	0	2	2	4
<i>Chrysomya ruffacies</i>	0	0	0	0	2	0	2	0	3	0	1	4	0	0	0	0
<i>Chloroprocta idoidea</i>	2	8	4	13	18	#	65	23	6	14	9	52	0	1	0	1
<i>Cochlyomyia macellaria</i>	3	0	3	0	6	1	13	1	1	1	0	3	0	0	0	0
<i>Hemilucilia segmentaria</i>	5	1	2	1	7	5	21	4	3	2	4	13	0	1	1	2
<i>Mesembrinella bicolor</i>	2	2	0	0	0	1	5	0	0	0	1	1	1	0	1	2
<i>Paralucilia paraensis</i>	0	0	0	0	2	4	6	0	0	1	0	1	0	0	0	0
<i>Paralucilia pseudolyrcea</i>	3	0	0	0	1	0	4	0	1	0	0	1	0	1	3	4
Totales							201					40				9

A las 72 horas de exposición, se capturaron un total de 663 especímenes, distribuidos en seis géneros y trece especies. La mayor captura correspondió a la especie *Chrysomya megacephala*, con 428 especímenes, seguido de la especie *Chloroprocta idoidea*, con 108 especímenes y, por último, la especie *Hemilucilia segmentaria*, con 46 especímenes (Cuadro 6).

Cuadro 6. Totales de especies capturadas a las 72 horas de exposición en el parque nacional soberanía (PNS).

ESPECIES DE MOSCAS	PRIMERA HORA (MIN)						TOTAL	SEGUNDA HORA (MIN)				TOTAL	TERCERA HORA (MIN)			TOTAL
	10	20	30	40	50	#		15	30	45	60		20	40	60	
	Calliphoridae															
<i>Chrysomya megacephala</i>	83	29	37	45	25	#	238	30	29	12	17	88	38	11	53	102
<i>Chrysomya ruffacies</i>	8	5	4	4	3	0	24	0	0	2	0	2	2	0	1	3
<i>Chloroprocta idoidea</i>	27	10	5	4	2	2	50	8	5	4	5	22	11	3	22	36
<i>Cochlyomyia macellaria</i>	5	4	2	8	3	3	25	3	1	1	0	4	3	1	3	7
<i>Hemilucilia segmentaria</i>	6	9	8	3	4	3	33	2	4	1	0	7	3	1	2	6
<i>Mesembrinella bicolor</i>	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<i>Paralucilia paraensis</i>	3	0	1	0	0	0	4	0	0	0	0	0	0	2	0	2
<i>Paralucilia pseudolyrcea</i>	1	0	3	0	0	1	5	1	2	1	0	4	0	0	0	0
Total							380					127				156

A las 96 horas de exposición, se capturó un total de 61 especímenes. La especie más capturadas fueron *Mesembrinella bicolor*, *Chloroprocta idoidea*, y *Hemilucilia segmentaria* (Cuadro 7).

Cuadro 7. Total, de especies capturadas a las 96 horas de exposición en el parque nacional soberanía (PNS).

ESPECIES DE MOSCAS	PRIMERA HORA (MIN)						TOTAL	SEGUNDA HORA (MIN)				TOTAL	TERCERA HORA (MIN)			TOTAL
	10	20	30	40	50	#		15	30	45	60		20	40	60	
Calliphoridae																
<i>Chrysomya megacephala</i>	0	2	1	1	2	0	6	0	0	1	1	2	1	2	2	5
<i>Chrysomya ruffacis</i>	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<i>Chloroprocta idoidea</i>	1	3	1	0	0	1	6	0	1	1	2	4	1	2	2	5
<i>Hemilucilia segmentaria</i>	0	4	1	0	2	1	8	0	0	2	1	3	2	1	0	3
<i>Mesembrinella bicolor</i>	0	2	2	1	1	0	6	1	1	0	0	2	7	0	1	8
<i>Paralucilia paraensis</i>	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<i>Paralucilia pseudolyrcea</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1

DISCUSIÓN

La mayor captura de moscas correspondió a las especies *Chrysomya megacephala*, *Chloroprocta idoidea*, *Hemilucilia segmentaria* y *Cochliomyia macellaria* (Fig. 1). Estos resultados coinciden en parte con los reportados por Amat (2009), en la Amazonía Colombiana, las especies que sobresalieron fueron *Chrysomya megacephala*, *Lucilia eximia*, *Hemilucilia segmentaria*, *Hemilucilia semidiaphana*, y *Lucilia cuprina*, atraídas con cebos de hígado, mientras que las especies *Chrysomya albiceps*, *Chloroprocta idoidea* y *Mesembrinella peregrina* fueron atraídas con carne picada.

De Sousa & Von Zuben (2012), emplearon hígado de res y sardina como atrayentes, reportaron un total de 1253 especímenes de la familia Calliphoridae. Las especies más abundantes fueron *Lucilia eximia*, con 794 especímenes, seguidas de *Chrysomya albiceps*, con 145 especímenes, *Chrysomya megacephala*, con 134 especímenes y en menor cantidad las especies, *Hemilucilia segmentaria*, con 95 especímenes, *Hemilucilia semidiaphana*, con 40 especímenes,

Cochliomyia macellaria con dos especímenes, *Chloroprocta idoidea* con seis especímenes, *Mesembrinella peregrina* con 14.

Atendiendo a estos resultados parece existir ciertas preferencias de las moscas por determinados sustratos nutricionales. En cuanto a la

presencia en los hábitats, refleja la similitud en algunas especies lo que pudiera deberse a la semejanza en los mismos. Contrario a diferencia que pudiera deberse a la vegetación del lugar, la metodología de captura empleada, la duración y la estacionalidad en la que se realizó el estudio.

Chrysomya megacephala, acaparo y explotó mejor los tejidos es ambos ecosistemas. Probablemente por ser la especie más abundante en el medio, la de mayor adaptabilidad, asociado a su estrategia de forrajeo, lo que le permite localizar y colonizar rápidamente recursos efímeros.

Según Prado & Guimaraes (1982), *Chrysomya megacephala* es buena estratega, con hábitos de alimentación generalista, que se adapta a los diversos ambientes, como lo son los fragmentos boscosos. Lo que también fue evidente en nuestro estudio, debido a que fue la especie más dominante, tanto en el medio intervenido como en el área boscosa (Cuadro 1). D'almeida & Almeida (1998) también la registraron la captura más abundante el en área intervenida que en el área boscosa. Byrd & Castner (2001), reportaron que es una de las que primero llega a los restos de animales y humanos, en las primeras etapas de la descomposición. Lo que también puede deberse a su capacidad dispersión y a que posee quimiorreceptores sensibles para la detección de olores, lo que les confiere ciertas ventajas adaptativas frente a otras especies, al momento de encontrar y colonizar un cadáver fresco. (Gonçalves *et al.* (2011) reportaron que *Chrysomya megacephala* fue las más abundante en su estudio. Sin embargo, Montoya *et al.* (2009). la reportan en preferentemente en áreas de bosques y rural. Otros investigadores reportan estas especies como indicadora del IPM en Malasia, Tailandia y China (Kavitha *et al.* 2013).

El cuanto a la preferencia por los tejidos se obtuvo que las moscas fueron más abundantes en el hígado que en el corazón. Lo que se debe probablemente a la consistencia más suave del mismo y que en el inicio de la descomposición se produce olores putrefactos más fuerte en el hígado que en el corazón (Cuadro 2).

Estudios realizados por otros autores muestran coincidencias con nuestros resultados, por ejemplo, Montoya *et al.* (2009), emplearon vísceras de pollo, excremento humano, cebolla en descomposición y pescado, en un área intervenida (área urbana y rural) y en un área boscosa. Reportaron que la mayor captura se observó con las vísceras

de pollo, seguido del pescado descompuesto. Olea *et al.* (2012), empleando hígado de res, reportaron mayor captura en un área intervenida que en el área boscosa. De Sousa & Von Zuben, (2012) empleando hígado de res y sardina, reportaron resultados diferentes a los nuestros, capturando más especímenes en el área boscosa que en el área intervenida.

Los resultados obtenidos en nuestro estudio pueden deberse a diversos factores como la influencia de factores bióticos y abióticos sobre los insectos (Almeida & Gonçalves, 2007). La ocurrencia y variación en términos de abundancia ha sido asociada a variaciones de temperatura y la humedad relativa (Chen & Ye, 2007) y a la precipitación (Lopes *et al.* 2008).

Al comparar la diversidad y abundancia de moscas, en las áreas de muestreo encontramos que en el área intervenida se registró la mayor captura de especímenes que en el área boscosa (Cuadro 1). Lo que pudiera deberse a que las moscas Calliphoridae aprovechan mejor los espacios abiertos e intervenidos, creados por el hombre, debido a las ventajas adaptativas que les facilitan de encontrar los sustratos, que emplean como alimento y para la crías de su prole, mientras que en el bosque es un área más cerrada por los árboles y la circulación del aire no fluye normalmente como ocurre en un espacio abierto; otro factor que pudiera incidir es la claridad del sol mientras menos intensas menor cantidad de moscas.

Lo que podría contribuir para confirmar que algunas especies que prefieren las áreas intervenidas porque son extraordinariamente favorecidas por las actividades que realiza el hombre en el medio, al disponer de mayor cantidad de recursos, amplitud de espacios abiertos para forrajear, mayor disponibilidad de restos orgánicos (carcasas, excretas y frutas descompuestas); y disminución de la competencia por el recurso. Además, en las áreas intervenidas los olores de la descomposición se difunden con mayor facilidad, porque la circulación de las corrientes de aire circula en diferentes direcciones, por lo que, en ocasiones sus hábitats pueden estar superpuestos.

Encontramos que ambas áreas mostraron bastante similitud en cuanto a la diversidad de especies, pero difieren notablemente en la cantidad de individuos capturados. Esta similitud en la diversidad puede deberse a la proximidad de las dos áreas. Ambas áreas estuvieron separadas aproximadamente 50 m una de otra y a 3 m entre los tejidos. Es decir,

el área boscosa fue intervenida para la construcción de una carretera, por lo que la intervención en el área intervenida está dentro de la influencia del área boscosa. De manera que las distancias entre las áreas son mínimas y, además por los márgenes de las zonas ecotónicas a ambos lados, fueron las variables que posiblemente determinaron la similitud de especies entre las dos áreas.

Otra especie también abundante durante el estudio fue *Chrysomya rufifacies* y *Mesembrinella bicolor*, *Chrysomya megacephala*, las mismas arribaron a los pocos minutos de haber colocado los tejidos (Cuadro 3). También Kyerematen *et al.* (2013), reportaron el arribo temprano de esta especie, en el estado fresco de la descomposición. Wolff (2001), en Colombia, observó el arribo a los 30 minutos de exposición y la ovoposición en la etapa de hinchazón. Estudios realizados en Malasia, Tailandia y China han reportado a esta especie en interiores de viviendas (Syamsa *et al.* 2015)

A las 24 horas de exposición el hígado, tenía una apariencia firme, con superficie lisa, su color cambió de rojo a marrón pálido y con áreas verdes oscuras. Se incrementó en el área el olor a la descomposición. La mayor captura de especies fue el área boscosa con 30 especímenes. Las especies más abundantes fueron *Chrysomya megacephala*, seguido de *Chloroprocta idioidea*, (Cuadro 4). El intervalo donde se registró la mayor captura de moscas fue a la segunda hora, fue a los 45 minutos.

Chloroprocta idioidea es una especie asintrópica, abundante en la selva amazónica y ampliamente distribuida en el Neotrópico (Amat, 2009). Es típica de área boscosa, por lo que su presencia en áreas intervenidas se puede deber a su estrecha cercanía con el área boscosa, lo que pudiera sugerir su gradual adaptación a los espacios abiertos e intervenidos por el hombre. En nuestro estudio, la especie *Chloroprocta idioidea* fue la segunda mayor colectada, lo que coincide con el estudio de Paraluppi (1996), quien la reportó como la segunda más abundante, de los especímenes colectados. Otros autores (Flores & Wolff, 2009, Vasconcelos *et al.* (2015), también la reportaron en ambiente boscoso principalmente atraída en el estado de descomposición activa.

A las 48 horas de exposición en el hígado, la mayor captura de moscas correspondió a las especies *Chrysomya megacephala*, *Chloroprocta*

idioidea, *Hemilucilia segmentaria* y *Cochliomyia macellaria* (Cuadro 5). Ramos-Pastrana & Wolff (2011), reportaron además el arribo de *Cochliomyia macellaria* en condiciones soleadas y *Hemilucilia segmentaria*, en condiciones de sombra a los cuatro y siete minutos, respectivamente de exposición. En un estudio realizado por Gonçalves *et al.* (2011), reportaron un alto grado alto de sinantropía para la especie *Hemilucilia semidiaphana*. A este nivel, el hígado emitía el olor más intenso y la consistencia menos firme, con aspecto algo hinchado o esponjoso, ligera deshidratación, predominante color verdoso.

Hemilucilia semidiaphana fue la especie tercera mayor colectada. El género *Hemilucilia*, comprende especies distribuidas en varios países de América Central y del Sur, especialmente se encuentran en áreas boscosas (Linhares, 1981). Es una especie Neotropical, ha sido registrada en Colombia (Papet *et al.* 2004). También Ferreira & Barbola (1998), reportan que es típica de área boscosa. En tanto que Barbosa *et al.* (2010), reporta bajas cantidades en áreas urbanas.

En tanto que, a las 48 horas, el corazón tenía una consistencia más firme y un color rojo más pálido. El mayor registró especímenes ocurrió en el área intervenida. Las especies dominantes fueron las mismas especies que arribaron al hígado.

A las 72 horas de exposición las especie más capturadas fueron *Chrysomya megacephala*, *Chloroprocta idioidea*, *Hemilucilia segmentaria* y *Cochliomyia macellaria* (Cuadro 5). En los tejidos se observó un notable aumento en el número de especímenes, lo que puede deberse al intenso desprendimiento de sustancias volátiles, que son los atrayentes químicos que atraen a las moscas a alimentarse o a ovopositor.

A las 96 horas de exposición, los tejidos se han desintegrado en su totalidad, solo quedan restos amorfos y acuosos en los recipientes. La mayor captura se registró en el área boscosa. La especie que sobresalió en el área fue *Mesembrinella bicolor*, seguido de *Chrysomya megacephala* y *Hemilucilia segmentaria* (Cuadro 6). En el caso de corazón, el mismo presentaba un color crema-grisáceo pálido, con un olor fuerte a descomposición (Cuadro 6). Un estudio realizado por Hernández & Terrado (2004), reportaron que *Hemilucilia segmentaria*

prefiere áreas intervenidas. Salviano (1996), la señaló como una especie importante en el proceso de descomposición.

La diversidad de especies cerca de un área boscosa confirma la importancia de estos sitios como refugios naturales, debido a que les ofrecen unas condiciones estables en término de luz, humedad y temperatura, es decir, ambientes ideales para que coexistan especies asinatópicas como *Hemilucilia segmentaria*, *Mesembrinella bicolor* y *Chloroprocta idioidea*, *Paralucilia fulvinota*, *Paralucilia pseudolyrcea* que son exclusivas de áreas boscosas (Cuadro 7). Nuestros resultados coinciden en parte con los reportados por (Cabrini *et al.* 2013, Montoya *et al.* (2009) donde las han registrados sido asociadas con la selva costera y Amazónica.

CONCLUSIONES

Las principales moscas Calliphoridae que arribaron a los tejidos pudieran ser consideradas indicadoras forenses primarias y secundarias de acuerdo con el orden en que arriban, tanto en el área urbana como en el área boscosa. Ambas áreas comparten especies que sobrepasan sus hábitats.

La especie *Chrysomya megacephala*, fue que explotó mejor los recursos evaluados en el estudio, en ambos ecosistemas.

Probablemente las especies más abundantes en el medio poseen una la mayor adaptabilidad, asociado a sus estrategias de forrajeo, lo que les permite localizar y colonizar rápidamente recursos efímeros.

La captura de moscas en las dos áreas permitió conocer que algunas especies que son más frecuentes en hábitat selváticos, que otras son más frecuentes en áreas intervenidas, mientras que las que comportan hábitats pudieran ser especies que están adaptándose, en proceso a la transición, del área boscosa al área intervenida.

El área intervenida presentó mayor cantidad de especímenes que en el área boscosa debido a que puede concentrar mayor disponibilidad de recursos tróficos, áreas para forrajear—y disminuir la competencia.

En cuanto a la preferencia por los tejidos se observó que las moscas mostraron mayor preferencia por el hígado que por el corazón, probablemente por factores intrínsecos, por la consistencia de estos, siendo más blanda en el hígado que el corazón y, a la intensa emanación y extensión de las sustancias volátiles en el área intervenida que en la boscosa.

REFERENCIAS

Almeida, F.S. & Gonçalves, L. (2007). Efeitos da temperatura e do alimento no desenvolvimento de *Dysdercus maurus* Distant (Hemiptera, Pyrrhocoridae). *Revista Brasileira de Entomologia*. 51(4): 506-511.

D'almeida, J.M. & Almeida, J.R. (1998). Nichos tróficos em dípteros caliptrados, no Rio de Janeiro. *Revista Brasileira de Biologia* 58(4): 563-570

Amat, E.C. (2009). Contribución al conocimiento de las Chrysomyinae y Toxotarsinae (Diptera: Calliphoridae) de Colombia. *Revista Mexicana de Biodiversidad*. 80(3): 693-708.

Amendt, J.; Richards, C.S., Campobasso, C.P., Zehner, C.P. & Hall, M.J. (2010). Forensic Entomology: applications and limitations. *Forensic Science, Medicine, and Pathology*. 7(4): 379- 392 doi: 10.1007/s12024-010-9209-2.

Autoridad Nacional del Ambiente (ANAM), (2010). Atlas Ambiental de la República de Panamá. Editora Novo Art S.A. Primera edición. 190 pp.

Barros de Souza, A.S.; Kirst, F.D. & Krüger, R.F. (2008). Insects of forensic importance from Rio Grande do Sul state in southern Brazil. Brazil. *Revista Brasileira de Entomologia*. 52(4): 641-646.

Benecke, M. (2001). A brief history of forensic entomology. *Forensic Sci Int*. 120 (1-2): 2-14.

Bermúdez, S.E. (2007). Lista preliminar de la familia Calliphoridae (Diptera: Oestroidea) de Panamá. *Tecnociencia*, 9: 101-112.

Buitrago, Y., R.J. Miranda y S.E. Bermúdez. (2012). Calliphoridae (Insecta: Diptera) de Ciudad de Panamá, Panamá, con énfasis en la distribución actual del género *Chrysomya* Robineau-Desvoidy 1830. *Boletín de la Sociedad Entomológica Aragonesa* (S.E.A.) 49: 303-307.

Byrd, J.H. & Castner, J.L. (Eds). (2010). Forensic Entomology: The Utility of Arthropods in Legal Investigations Forensic Entomology: The Utility of Arthropods in Legal Investigations. 2nd Edition. CRC Press, Boca Raton. 681 pp.

Cabrini, I.; Grella, M.D., Andrade, C.F. & Thyse, P.J. (2013). Richness and composition of Calliphoridae in an Atlantic Forest fragment: implication for the use of dipteran species as bioindicators. *Biodiversity and Conservation*. 22(11): 2635-2643.

Camacho, G. (2005). Sucesión de la entomofauna cadavérica y ciclo vital de Calliphora vicina (Diptera: Calliphoridae) como primera especie colonizadora, utilizando cerdo blanco (*Sus scrofa*) en Bogotá. *Revista Colombiana de Entomología*. 31(2):189-197.

Carrillo, G.E.; Alcántara, M.A., Arias, C.C., Infante, C. & Villacorta, M. (2015). Entomofauna de interés forense asociada a restos cadavéricos de cerdos (*Sus scrofa* L.), expuestos a condiciones de campo en Lambayeque - Perú. *Revista de Perú. Entomología*. 50(1): 1-11

Carvalho, L.M.; Thyssen, P.J., Linhares, A.X. & Palhares, F.A. (2000). Checklist of arthropods associated with pig carrion and human corpses in southeastern Brazil. *Mem. Instituto Oswaldo Cruz*. 95(1):135-138.

Catts, E.P. & Haskell, N.H. (1990). Entomology and death: A procedural guide. Joyce's Print Shop Inc., Clemson, 1-182.

- Catts, E.P. & Goff, M.L. (1992). Forensic entomology in criminal investigations. *Annual Review of Entomology*. 37: 253-272.
- Chen, P. & Ye, H. (2007). Population dynamics of *Bactrocera dorsalis* (Diptera: Tephritidae) and analysis of factors influencing populations in Baoshanba, Yunnan, China. *Entomological Science*. 10(1): 141-147.
- D' Almeida, J.M. & López, H. (1983). Sinantropía de dípteros calíptros (Calliphoridae) no Estado do Rio de Janeiro. *Arquivos Universidade Federal Rio Janeiro*. 6: 38-48.
- Denno, R.F. & Cothran, W.R. (1975). Niche relationships of a guild of necrophagous flies. *Annals of the Entomological Society of America*. 68(4): 741-754.
- De Sousa, C.R. & Von Zuben, C.J. (2012). Diversity and Synanthropy of Calliphoridae (Diptera) in the Região of Rio Claro, SP, Braz. *Neotropical Entomologia*. 41(3):243–248.
- Días, S.V.; Moura, T.B. & Barreto, T.P. (2015). Diversity of forensically Important Dipteran species in different environments in Northeastern Brazil, with notes on the attractiveness of animal baits. *Florida Entomologist*. 98(2):770-775.
- Ferraz, A.C.; Gadelha, B.Q. & Aguiar-Coelho, V.M. (2010). Influência Climática e Antrópica na Abundância e Riqueza de Calliphoridae (Diptera) em Fragmento Florestal da Reserva Biológica do Tinguá, Rio de Janeiro. *Neotropical Entomology*. 39(4):476-485.
- Ferreira, M.J. & Barbola, I.F. (1998). Sinantropía de Califorídeos (Insecta, Diptera) de Curitiba, Paraná, Brasil. *Revista Brasileira de Biologia* 58 (2): 203-209.
- Flórez, E. & Wolff, M. (2009). Descripción y clave de los estadios inmaduros de las principales especies de Calliphoridae (Diptera) de importancia forense en Colombia. *Neotropical Entomology*. 38(3): 418-429.

Garcés, P.A.; S.E. Bermúdez & G.E. Quintero. (2004). Determinación de la entomofauna asociada a carcasas de cerdos domésticos vestidos (*Sus scrofa*), en el Puerto de Vacamonte, Provincia de Panamá. *Tecnociencia*. 6: 59-74.

Garcés, P.A. & Rosas, M.B. (2016). Comparación de las poblaciones de moscas necrófagas en dos localidades Panamá y Chiriquí. *Centros*. 5: 56-88.

Garcés, P. A. & Molinar, M. (2020). Calliphoridae de interés forense asociadas a tres cebos de cerdos doméstico (*Sus scrofa* l.) en un área rural, corregimiento de la Pintada, provincia de Coclé, Panamá. *Tecnociencia*, 23:87-101.

Garcés, P.A.; Rosas, M.B., Portillo, O.J., Ross, I.I., Jiménez, C.O., Moreno, C.M., Cobos, J.J., Zapata, O., Chiari, C., Ku, V., Gutiérrez, M.V., Góndola, Y., Mendieta, C., Ochoa, I., & Pitti, W. (2021). Comparación de las principales moscas necrófagas atraídas por hígados humanos en estado de descomposición, expuestos a diferentes intervalos de tiempo, en un área urbana de la provincia de Panamá. *Tecnociencia*. 23: 26-49.

Gonçalves, L.; Días, Á., Espindola, C.B. & Almeida, F.S. (2011). Inventário de Calliphoridae (Diptera) em manguezal e fragmento de Mata Atlântica na região de Barra de Guaratiba, Rio de Janeiro, Brasil. *Revista Brasileira de Biociências*. 9(1): 50-55.

Hernández, M. & Terrado, D. (2004). Sucesión de Dipteras Calliphoridae que participan en la en la descomposición de carroñas de ratas en un área boscosa y en un pajonal. Tesis Universidad de Panamá (C.R.U.C). 91p.

Kavitha, R.; Nazni, W.A., Tan, T.C., Lee, H.L. & Azirun, M.S. (2013). Review of forensically important entomological specimens collected from human cadavers in Malaysia (2005–2010). *J. Forensic Leg Med*. 20(5): 480-482.

Kyerematen, R.A.; Boateng, B.A., Haruna, M. & Eziah, V. (2013). Decomposition and insect succession pattern of exposed domestic pig (*Sus scrofa L.*) carrion. *J. Journal of Agricultural and Biological Science*. 8(11): 756-765.

Linhares, A.X. (1981). Synanthropy of Calliphoridae and Sarcophagidae (Diptera) in the city of Campinas, São Paulo, Brazil. *Revista Brasileira de Entomología*. 25(3):189–215.

Lopes, W.D.; Costa, F.H., Lopes, W.C., Baliero, J.C., Soares, V.E. & Prado, A.P. (2008). Abundância e sazonalidade de dípteros (Insecta) em graja aviária da região nordeste do estado de São Paulo, Brasil. *Revista Brasileira de Parasitologia Veterinária*. 17(1): 21-27.

Papet, T.; Wolff, M. & Amat, E.E. (2004). Los Califóridos, Éstridos, Rinofóridos y Sarcófágidos (Diptera: Calliphoridae, Oestridae, Rhinophoridae, Sarcophagidae) de Colombia. *Biota Colombiana*. 5(2): 201-208.

Paraluppi, N.D. (1996). Calliphoridae (Diptera) da Bacia do Alto Rio Rucu, Amazônia Central, Brasil. *Revista Brasileira de Zoologia* 13 (3): 553-559.

Pineda, K. (2011). Entomofauna asociada a la colonización inicial de un hígado humano en estado de descomposición colocado en el Parque Natural Metropolitano de la ciudad de Panamá. Proyecto de intervención para aspirar al grado de Magister en Ciencias Clínicas con Especialización en Medicina Legal. Universidad de Panamá.

Prado, A.P. & Guimaraes, J. H. (1982). Estado atual de dispersão e distribuição do genero *Chysomyia* Robineau-Desvoidy na regio neotropical (Diptera, Calliphoridae). *Revista Brasileira de Entomologia* 26: 225-231.

Montoya, A.L.; Sánchez, J.D. & Wolff, M. (2009). Sinantropía de Calliphoridae (Diptera) del Municipio La Pintada, Antioquia – Colombia. *Revista Colombiana de Entomología*. 35(1): 73-82.

Olea, S.M.; Dantur, M.J., Mulieri, P.R., Patitucci, L.D., Centeno, N.Y. & Mariluis, J.C. (2012). Calliphoridae (Diptera) en parches de Selva Predemontana con distinto grado de intervención antrópica en Tucumán (Argentina). *Revista Sociedad Entomológica de Argentina*. 71(3-4): 249-256.

Paraluppi, N.D. (1996). Calliphoridae (Diptera) da Bacia do Alto Rio Rucu, Amazônia Central, Brasil. *Revista Brasileira de Zoologia*. 13(3): 553-559.

Prado, A.P. & Guimarães, J.H. (1982). Estado atual da distribuição e dispersão das espécies do gênero *Chrysomya* R-D na região neotropical (Diptera: Calliphoridae). *Revista Brasileira Entomologia*. 26 (3-4): 225-231.

Ramos-Pastrana, Y. & Wolff, M. (2021). Entomofauna Cadavérica Asociada a Cerdos Expuestos al Sol y Sombra, en el Piedemonte Amazónico Colombiano. *Revista Momentos de Ciencia*, 8: 45-54.

Rodríguez, J.N. & Salazar, J.L. (2014). Sucesión de la entomofauna cadavérica a partir de un biomodelo con vísceras de res. *Revista de la Facultad de Ciencias de la Salud. Universidad de Carabobo*. 18(2): 35-39.

Syamsa, R.A.; Omar, B., Zuha, R.M., Faridah, M.N., Swarhib, M.S., Hidayatulfathi, O. & Shahrom, A.W. (2015). Forensic entomology of high-rise buildings in Malaysia: Three case reports. *Trop. Biomed*. 32(2): 291–299

Salviano, R.J. (1996). Sucessão de Diptera Calyptratae em carcaça de *Sus scrofa*, L. Ms.D Thesis, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 123 pp.

Vasconcelos, S.D.; Barbosa, T.M. & Barreto, T.P. (2015). Diversity of forensically important Dipteran species in different environments in northeastern Brazil, with notes on the attractiveness of animal baits. *Florida Entomologist*. 98(2):769-775.


Velásquez, Y.; Gobbi, P; Martínez, A.S. & Rojo, S. (2015). Contribución al conocimiento de los Calliphoridae y Sarcophagidae presentes en un agrosistema del Sureste de la Península Ibérica. Universidad de Alicante. *Ciencia Forense*. 193-206.

Wolff, M.; Uribe, A., Ortiz, A. & Duque, P. (2001). A preliminary study of forensic entomology in Medellin, Colombia. *Forensic Science International*. 120(1-2): 53-59.




EUGLOSSINI BEES (HYMENOPTERA: APIDAE) IN SANTA RITA, PANAMA

Janitce A. Harwood¹, Yostin J. Añino², Alejandro Parra-H^{3,4}

¹Universidad de Panamá, Facultad de Ciencias Naturales, Exactas y Tecnología, Departamento de Botánica, Panamá. harwoodjanitce@gmail.com 

²Universidad de Panamá, Museo de Invertebrados G. B. Fairchild, Panamá.

³Corporación para la Gestión de Servicio Ecosistémicos, Polinización y Abejas (SEPyA), Bogotá, Colombia. yostin0660@gmail.com 

⁴Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ciencias, Departamento de Biología, Laboratorio de Investigaciones en Abejas (LABUN), Colombia. varnishpt@gmail.com 

Fecha de recepción: 22 julio de 2022

Fecha de aceptación: 13 de octubre de 2022

ABSTRACT

Santa Rita is a town located in the province of Colón, Panama. This area is threatened by various human activities that not only threaten the landscape and its vegetation, but also the integrity of the pollinators that live there. Considering this, we collected samples of bees from the Euglossini tribe in a fragmented area of Santa Rita, to get an idea of the population status in which these bees could be found at the site. Sampling was carried out one day during the dry season and one day in the rainy season of 2017. We collected 179 males belonging to 20 species, belonging to the three genera *Euglossa* (14 spp.), *Eufriesea* (4 spp.), and *Eulaema* (3 spp.). We know that these results are not enough to determine if Euglossini bee populations are stable or have decreased, but they give us a basis on the abundance and richness of the recorded species.

KEYWORDS

Abundance, Colón, conservation, fragmented ecosystems, euglossines

ABEJAS EUGLOSSINI (*HYMENOPTERA: APIDAE*) EN SANTA RITA, PANAMÁ

RESUMEN

Santa Rita es un poblado ubicado en la provincia de Colón, Panamá. Esta zona está amenazada por diversas actividades humanas que no solo atentan contra el paisaje y su vegetación, sino también con la integridad de los polinizadores que habitan allí. Considerando esto, colectamos muestras de abejas de la tribu Euglossini en un área fragmentada de Santa Rita, con el objetivo de hacernos una idea del estatus poblacional en el que podrían encontrarse estas abejas en el sitio. El muestreo se realizó un día durante la época seca y un día en la época lluviosa del 2017. Colectamos 179 machos pertenecientes a 20 especies, pertenecientes a los tres géneros *Euglossa* (14 spp.), *Eufriesea* (4 spp.) y *Eulaema* (3 spp.). Sabemos que estos resultados no son suficientes para determinar si las poblaciones de abejas Euglossini se encuentran estables o han disminuido, pero nos da una base sobre la abundancia y riqueza de las especies registradas.

PALABRAS CLAVE

Abundancia, Colón, conservación, ecosistemas fragmentados, euglossinos

INTRODUCTION

Euglossine bees are distributed exclusively in the Neotropical region and these bees play a critical role in the stability of several plant families since they offer pollination services to a wide range of plants, especially orchid species through a wide range of distance (Dressler 1968; Williams & Dodson 1972; Dressler 1982; Silva & Rebêlo 2002; Roubik & Hanson 2004; Ramírez *et al.* 2002; Parra-H *et al.* 2016). These bees have a high affinity to humid and drier forests (Dressler 1982; Silveira *et al.* 2002; Roubik & Hanson 2004; Santos & Añino 2016). Euglossine bees have been used to evaluate environment quality according to their distribution, susceptibility to disturbance, and resource quality (Pemberton & Wheeler 2006; Hedström *et al.* 2006; Parra-H & Nates-Parra 2007; Meléndez *et al.* 2015; Añino *et al.* 2019).

Studies have shown a decline of pollinators and flying insect biomass around the world due to deforestation, pollution, use of pesticides, fertilizers, herbicides, and climate change (Humphries *et al.* 1995;

Vanbergen 2013; Goulson *et al.* 2015; Holland *et al.* 2015; Nemésio *et al.* 2016; Dudley *et al.* 2017; Hallmann *et al.* 2017; Habel *et al.* 2019; Vega-Hidalgo *et al.* 2020). Habitat fragmentation has been recognized as one of the main causes of biodiversity loss (Fahrig 2003; Biesmeijer *et al.* 2006; Potts *et al.* 2010; Krauss *et al.* 2010; Lebuhn *et al.* 2012; Haddad *et al.* 2015; Ollerton 2017; Sánchez & Wyckhuys 2019; Van Klink *et al.* 2020). Bee population declines are occurring even in protected areas (Hallmann *et al.* 2017; Rada *et al.* 2019; Vega-Hidalgo *et al.* 2020). The slightest alteration to plant abundance or phenology due to anthropogenic changes and trends in biodiversity decline may therefore have severe consequences for insect populations (Sánchez & Wyckhuys 2019; Basset & Lamarre 2019). Euglossini bees' population are declining due to environmental impacts caused by human activities and competition (Hedström *et al.* 2006; Brosi 2009; Ramalho *et al.* 2009; Nemésio & Silvera 2010; Potts *et al.* 2010; Willmer 2012; Vega-Hidalgo *et al.* 2020). Contrary, Roubik *et al.* 2021 reported stable populations in a long-term monitoring in Panama.

Given the importance of orchid bees, the lack of recent information on the region in the past 30 years, continuous development of human activities, deforestation, and current bees and pollinators declines; here we provide recent data about the abundance of Euglossine bees, showing preliminary data of two samplings. Considering previous records on Santa Rita Colon-Panama by Ricklefs *et al.* (1969) and Roubik & Ackerman (1987). Few flora studies have been carried out in Colón and no formal study have been performed in Santa Rita, where it is believed there is high endemism (Lewis 1971; Ortiz *et al.* 2019).

MATERIAL AND METHODS

Site selection

Considering the two previous censuses performed on the area, we aimed to detect evidence of changes in euglossine bees' communities in Santa Rita. The selected area is a fragmented habitat near forest patches, where trees approximately reached a height of less than 8 meters. It is in Colón, Republic of Panama, (9°20'N, 79° 46'W) Figure 1. It is part of the Panama Canal, in the sub-basin of Gatun River (206 m elevation). The community is located between the protected areas of Chagres and

Soberanía National Parks, which are part of the Mesoamerican Biological Corridor and denotes the convergence of biodiversity points in Mesoamerica and Chocó-Darién and forests of the Panama Canal Watershed that contribute to its proper functioning (Ibáñez *et al.* 2002; Moyer & Shebell 2014).



Figure 1. Location of the study area (Santa Rita). Google Earth 2022.

Collection

Orchid bee males were collected using an entomological net. Three baits were used: cineole, methyl salicylate, and vanillin. The soaked cotton balls laden baits were hung at about 2 m above the ground and 5 m from each other as described in Nemésio & Morato (2006). These synthetic products mimic natural components found mainly in orchid flowers and are collected by male Euglossini bees to attract females during courtship (Dressler 1982; Eltz *et al.* 2005). Samplings were done twice, one day each season: the first one by the end of the dry season and the other during the rainy season, 8 April 2017, and 21 October 2017, respectively. Both collections were done from 8:00 a.m. to 12:00 p.m. Captured bees were pinned, identified, and deposited at the Museo de

Invertebrados G. B. Fairchild-Universidad de Panamá (MIUP) in Panamá, Panamá. Taxonomic characterization was based on Roubik & Hanson (2004) key.

RESULTS AND DISCUSSION

We collected a total of 179 male Euglossini bees belonging to 20 species, and three genera: 108 specimens during the dry season and 71 during the rainy season (table 1). *Euglossa* (14 spp.), *Eufriesea* (4 spp.), and *Eulaema* (3 spp.), which represent 30% of 70 species reported for Panama. During each season 13 species were recorded (Table 1). *Euglossa imperialis* Cockerell 1922 was the most abundant species, followed by *E. despecta* Moure 1968, *E. deceptrix* Moure 1968, *E. mixta* Friese 1899, and *Eulaema nigrita* Lepeletier 1841. Five species were collected during both seasons: *E. bursigera* Moure 1970, *E. championi* Cheeseman 1929, *E. imperialis* Cockerell 1922, *E. mixta* Friese 1899 and *E. nigrita* Lepeletier 1841 (Table 1). During both collections the methyl salicylate bait attracted most bees (58), followed by cineole (33) and vanillin (17). *E. deceptrix* was the only species attracted to all three scents. The species that registered the most individuals in April were *Euglossa despecta* Moure, 1968 (21), *E. imperialis*, and (19) and *E. deceptrix* (9); those of April were *E. imperialis* (26), *E. cognata* Moure 1970 (6), and *E. sapphirina* Moure 1968 (6).

This study was not as extensive, nor carried out in a protected area, as that of Roubik (2001) in Parque Soberanía, which reported that the most common of the set of species studied gradually declined. Roubik & Ackerman (1987) censused in February 1979, October 1979, March 1980 and February 1986, the same day each month and counted 46 species in Santa Rita Ridge, averaging 22 species per month (ranged 13-31) approaching the baits. We collected 13 species on both days, which is under their average, but still the minimum of their record. Ricklefs *et al.* (1969), reported having collected 22 species in Santa Rita Ridge attracting bees with 1,8-cineole, which is the most common attractant of orchid bees. It should be considered that factors such as the seasonality of the species and dispersion of the attractants employed could have influenced the results (Janzen *et al.* 1982; Pearson & Dressler 1985; Nemésio & Silveira 2004). It is necessary to conduct long-term studies to demonstrate trends.

Most of the species collected were from the genus *Euglossa*, which is the most diverse in the tribe (Roubik & Hanson 2004). The diversity and abundance of these bees could be determined by multiple factors such as climate, vegetation, and competition with similar species (Rosenzweig 1995). Even with small collection efforts, *E. imperialis* seems to be the most abundant species (Roubik & Ackerman 1987; Roubik 2001; Nemésio & Silveira 2007; Rasmussen 2009; Santos & Añino 2016). In general, during the wet season the species abundance decreased, which could be related to flower scarcity, the age distribution of male Euglossini community, and increase of bee numbers early in the year which may provide a flux of young bees with general chemical needs or another environmental factors (Ackerman 1983, 1985; Roubik 2001).

Ricklefs *et al.* (1969) mentioned 18 species of the genus *Euglossa*; 17 of these species were also mentioned by Roubik & Ackerman (1987), except for *E. villosa* Moure, 1968. *E. deceptrix* and *E. maculilabris* Moure, 1968 that can be found in the area. As we only collected one day in April and another in October, we did not record all species mentioned by Roubik & Ackerman (1987), but here we add *Euglossa obtusa*, *Eulaema marcii* and *Eufriesea rufocauda*. This may suggest changes to these bees' community composition. Several human activities are carried out at the area and its forests have been deforested for many years (Roubik & Ackerman 1987). Regardless this area is fragmented, Euglossini bees continue around in search of resources, and it seems that these bees inhabit disturbed areas when the land-use change caused by humans is not extreme, as can be deduced in Brosi *et al.* (2008) and Galgani-Barraza *et al.* (2019).

Table 1. Abundance of Euglossini bees attracted by different fragrances in Santa Rita Arriba, Colon, Panama. C= cineole, SM= methyl salicylate, VA= vanillin

CONCLUSION

Species	Fragrances	Dry season	Rainy season	Total, collected
<i>Eufriesea lucifera</i> Kimsey, 1977	VA		1	1
<i>Eufriesea pulchra</i> Smith, 1854	SM	3	4	7
<i>Eufriesea rufocauda</i> Kimsey, 1977	SM; VA	2		2
<i>Euglossa allosticta</i> Moure 1969	C		1	1
<i>Euglossa bursigera</i> Moure, 1970	C; VA	1	4	5
<i>Euglossa championi</i> Cheesman, 1929	SM; VA	6	1	7
<i>Euglossa cognata</i> Moure, 1970	SM		6	6
<i>Euglossa crassipunctata</i> Moure, 1968	SM		2	2
<i>Euglossa deceptrix</i> Moure, 1968	C; SM; VA	16		16
<i>Euglossa despecta</i> Moure, 1968	C; SM	24		24
<i>Euglossa imperialis</i> Cockerell 1922	C; SM	23	29	52
<i>Euglossa mixta</i> Friese, 1899	SM	15	4	19
<i>Euglossa nigrosignata</i> Moure, 1969	SM	1		1
<i>Euglossa obtusa</i> Dressler 1978	VA	1		1
<i>Euglossa sapphirina</i> Moure, 1968	SM; VA		7	7
<i>Euglossa tridentata</i> Moure, 1970	C; VA		5	5
<i>Euglossa variabilis</i> Dressler, 1982	C		2	2
<i>Eulaema marcii</i> Nemésio, 2009	VA	1		1
<i>Eulaema nigrata</i> Lepeletier 1841	C; VA	11	5	16
<i>Eulaema meriana</i> Oliver, 1789	SM	4		4
Abundance		108	71	179

Unlike previous studies conducted on the area, we collected 13 Euglossini bee species on both days; it is less than previous averages, possibly due to our small collection effort. This is concerning, but not enough to determine if these bee populations are stable or have declined, nor the possible causes. We know that these collections are not enough to reach any conclusion, but we believe that these preliminary results are locally interesting, so long-term studies that include ecological variables before and during long sampling collections are necessary to understand the trends and community composition that allow comparable statistical analyzes. Protection of insect biodiversity and ecosystem are reasons to conserve small ecosystem fragments. We encourage researchers to perform live sightings of bees and studies on the flora and vegetation of Santa Rita.

ACKNOWLEDGMENTS

Roberto Cambra for allowing us access to the Invertebrate Museum G. B. Fairchild- Universidad de Panamá (MIUP). Erin Krichilsky and Dumas Gálvez for their relevant comments and insights. Alonso Santos and Rubén Guardia for taxonomic verification and advice. We also thank Rosa De León and Ricardo Fontalvo for their help during fieldwork.

REFERENCES

Ackerman, J.D. (1983). Diversity and seasonality of male euglossine bees (Hymenoptera: Apidae) in Central Panama. *Ecology*, 64(2): 274–283.

Ackerman, J.D. (1985). Euglossine bees and their nectar hosts. *The botany and natural history of Panama*. (ed. D’Arcy, W.G. & Correa, M.D.), pp. 225-233. Missouri Botanical Garden, St. Louis, Mo.

Añino, Y., Parra-H, A., & Gálvez, D. (2019). Are Orchid Bees (Apidae: Euglossini) Good Indicators of the State of Conservation of Neotropical Forests?. *Sociobiology*, 66(1): 194-197.
<http://dx.doi.org/10.13102/sociobiology.v66i1.3679>

Basset, Y. & Lamarre, G.P. (2019). Toward a world that values insects. *Science*, 364(6447): 1230-1231.
<http://doi:10.1126/science.aaw7071>

Biesmeijer, J.C., Roberts, S.P., Reemer, M., Ohlemüller, R., Edwards, M., Peeters, T., Schaffers, A.P., Potts, S.G., Kleukers, R., Thomas, C.D., Settele, J., Kunin, W.E. (2006). Parallel declines in pollinators and insect-pollinated plants in Britain and the Netherlands. *Science*, 313(5785):351-354.
<http://doi:10.1126/science.1127863>

Brosi, B.J. (2009). The effects of forest fragmentation on Euglossini bee communities (Hymenoptera: Apidae: Euglossini). *Biol. Conserv.*, 142(2): 414–423. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2008.11.003>

Brosi, B.J., Daily, G.C., Shih, T.M., Oviedo, F., Durán, G. (2008). The effects of forest fragmentation on bee communities in tropical countryside. *J. Appl. Ecol.*, 45(3): 773-783. <http://doi:10.1111/j.1365-2664.2007.01412.x>

Dressler, R.L. (1968). Pollination by euglossine bees. *Evolution*, 22(1): 202-210.

Dressler, R.L. (1982). Biology of the Orchid bees (Euglossini). *Ann. Rev. Ecol. Evol. Syst.*, 13(1): 373-394.

Dudley, N., Attwood, S.J., Goulson, D., Jarvis, D., Bharucha, Z.P., & Pretty, J. (2017). How should conservationists respond to pesticides as a driver of biodiversity loss in agroecosystems? *Biol. Conserv.*, 209(1): 449-453.

Eltz, T., Sager, A., & Lunau, K. (2005). Juggling with volatiles: exposure of perfumes by displaying male orchid bees. *J. Comp. Physiol. A*, 191(7): 575-581. <http://doi:10.1007/s00359-005-0603-2>

Fahrig, L. (2003). Effects of habitat fragmentation on biodiversity. *Ann. Rev. Ecol. Evol. Syst.*, 34: 487-515. <http://doi:10.1146/annurev.ecolsys.34.011802.132419>

Galgani-Barraza, P., Moreno, J.E., Lobo, S., Tribaldos, W., Roubik, D.W., Wcislo, W.T. (2019). Flower use by late nineteenth-century orchid bees (*Eufriesea surinamensis*, Hymenoptera, Apidae) nesting in the Catedral Basílica Santa María la Antigua de Panamá. *J. Hymenopt. Res.*, 74:65-81. <http://doi:10.3897/jhr.74.39191>

Goulson, D., Nicholls, E., Botías, C., Rotheray, E. (2015). Bee declines driven by combined stress from parasites, pesticides, and lack of flowers. *Science*, 347(6229): 1255957.

Habel, J.C., Samways, M.J., & Schmitt, T. (2019). Mitigating the precipitous decline of terrestrial European insects: requirements for a new strategy. *Biodivers. Conserv.*, 28(6): 1343-1360. <https://doi.org/10.1007/s10531-019-01741-8>

Haddad, N.M., Brudvig, L.A., Clobert, J., Davies, K.F., Gonzalez, A., Holt, R.D., Lovejoy, T.E., Sexton, J.O., Austin, M.P., Collins, C.D., Cook, W.M., Damschen, E.I., Ewers, R.M., Foster, B.L., Jenkins, C.N., King, A.J., Laurance, W.F., Levey, D.J., Margules, C.R., Melbourn, B.A., Nicholls, A.O., Orrock, J.L. Song, D.X. & Townshend, J.R. (2015). Habitat fragmentation and its lasting impact on Earth's ecosystems. *Sci. Adv.*, 1(2): e1500052. <http://doi:10.1126/sciadv.1500052>

Hallmann, C.A., Sorg, M., Jongejans, E., Siepel, H., Hofland, N., Schwan, H., Stenmans, W., Müller, A., Sumser, H., Hörrn, T., Goulson, D. & Kroon, H. (2017). More than 75 percent decline over 27 years in total flying insect biomass in protected areas. *PloS one*, 12(10): e0185809. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0185809>

Hedström, I., Harris, J., & Fergus, K. (2006). Euglossine bees as potential bio-indicators of coffee farms: Does Forest access, on a seasonal basis, affect abundance? *Rev. biol. trop.*, 54(4): 1189-1195.

Holland, J.M., Smith, B.M., Storkey, J., Lutman, P.J., & Aebischer, N.J. (2015). Managing habitats on English farmland for insect pollinator conservation. *Biol. Conserv.*, 182: 215–222. <https://doi.org/10.1016/j.bioco.2014.12.009>

Humphries, C.J., Williams, P.H., Vane-Wright, R.I. (1995). Measuring biodiversity value for conservation. *Ann. Rev. Ecol. Syst.*, 26: 93-111. <https://doi.org/10.1146/annurev.es.26.110195.000521>

Ibáñez, R., Condit, R., Angehr, G., Aguilar, S., García, T., Martínez, R., Sanjurjo, A., Stallard, R., Wright, J. & Heckadon, S. (2002). An Ecosystem Report on the Panama Canal: Monitoring the Status of the Forest Communities and the Watershed. *Environ. Monit. Assess.*, 80(1): 65– 95. <http://doi:10.1023/A:1020378926399>

Janzen, D.H., DeVries, P.J., Higgins, M.L., & Kimsey, L.S. (1982). Seasonal and site variation in Costa Rican euglossine bees at chemical baits in lowland deciduous and evergreen forests. *Ecology*, 63(1): 66-74. <https://doi.org/10.2307/1937032>

Krauss, J., Bommarco, R., Guardiola, M., Heikkinen, R.K., Helm, A., Kuussaari, M., Lindborg, R., Ockinger, E., Pärtel, M., Pino, J., Pöyry, J., Raatikainen, K.M., Sang, A., Stefanescu, C., Teder, T., Zobel, M. & Steffan-Dewenter, I. (2010). Habitat fragmentation causes immediate and time-delayed biodiversity loss at different trophic levels. *Ecol. Lett.*, 13(5): 597-605. <http://doi:10.1111/j.1461-0248.2010.01457.x>

Lebuhn, G., Droege, S., Connor, E.F., Gemmill-Herren, B., Potts, S.G., Minckley, R.L., Griswold, T., Jean, R., Kula, E., Roubik, D.W., Cane, J., Wright, K.W. (2012). Detecting insect pollinator declines on regional and global scales. *Conserv. Biol.*, 27(1): 113-120. <https://doi.org/10.1111/j.1523-1739.2012.01962.x>

Lewis, W.H. (1971). High floristic endemism in low cloud forests of Panama. *Biotropica*, 3: 78-80.

Meléndez, V., Ayala, R., Delfin, H. (2015). Abejas como bioindicadores de perturbaciones en los ecosistemas y el ambiente. *Bioindicadores: Guardianes de nuestro futuro ambiental*. (ed. González, C., Vallarino, A., Pérez, J., Low, A.), pp. 347-370. El Colegio de la Frontera Sur, México.

Moyer, J., & Shebell, E. (2014). Human-jaguar competition and conflict: a case study in the Colón Biological Corridor. Accessed 22 April 2019. https://www.mcgill.ca/pfss/files/pfss/human-jaguar_competition_and_conflict_a_case_study_in_the_colon_biological_corridor_0.pdf

Nemésio, A., & Morato, E.F. (2006). The orchid-bee fauna (Hymenoptera: Apidae) of Acre state (northwestern Brazil) and a re-evaluation of euglossine bait-trapping. *Lundiana*, 7(1): 59-64.

Nemésio, A., Silva, D.P., Nabout, J.C., & Varela, S. (2016). Effects of climate change and habitat loss on a forest-dependent bee species in a tropical fragmented landscape. *Insect Conserv. Divers.*, 9(2): 149-160. <https://doi.org/10.1111/icad.12154>

Nemésio, A. & Silveira F.A. (2004). Biogeographic notes on rare species of Euglossini (Hymenoptera: Apidae: Apini) occurring in the Brazilian Atlantic rainforest. *Neotrop. Entomol.*, 33(1): 117-120. <https://doi.org/10.1590/S1519-566X2004000100021>

Nemésio, A., & Silveira, F.A. (2007). Diversity and distribution of orchid bees (Hymenoptera: Apidae) with a revised checklist of species. *Neotrop. Entomol.*, 36(6): 874-888. <https://doi.org/10.1590/S1519-566X2007000600008>

Nemésio, A., Silveira, F.A. (2010). Forest Fragments with larger core areas better sustain diverse orchid bee faunas (Hymenoptera: Apidae: Euglossini). *Neotrop. Entomol.*, 39(4): 555–561. <https://doi.org/10.1590/S1519-566X2010000400014>

Ollerton, J. (2017). Pollinator diversity: distribution, ecological function, and conservation. *Annu. Rev. Ecol., Evol. Syst.*, 48: 353-376. <https://doi.org/10.1146/annurev-ecolsys-110316-022919>

Ortiz, O.O., Flores, R., McPherson, G., Carrión, J.F., Campos-Pineda, E., & Baldini, R.M. (2019). Additions to the flora of Panama, with comments on plant collections and information gaps. *Check List*, 15(4): 601-627. <https://doi.org/10.15560/15.4.601>

Parra-H, A. & Nates-Parra, G. (2007). Variation of the orchid bees community (Hymenoptera: Apidae) in three altered habitats of the Colombian “llano” piedmont. *Rev. biol. trop.*, 55 (3-4): 931-41.

Parra-H, A., Otero, J., Sandino, J.C., Ospina, R. (2016). Abejas de las orquídeas (Hymenoptera: Apidae Euglossini) y su importancia como polinizadoras de amplio rango en ecosistemas naturales. *Iniciativa colombiana de polinizadores: Abejas ICPA*. (ed. Nates-Parra, G.), pp. 141-155. Universidad Nacional de Colombia, Bogotá.

Pearson, D.L., & Dressler, R.L. (1985). Two-year study of male orchid bee (Hymenoptera: Apidae: Euglossini) attraction to chemical baits in lowland south-eastern Peru. *J. Trop. Ecol.*, 1(1): 37-54. <https://www.jstor.org/stable/2559713>

Pemberton, R.W., & Wheeler, G.S. (2006). Orchid bees don't need orchids: evidence from the naturalization of an orchid bee in Florida. *Ecology*, 87(8): 1995-2001. doi: [10.1890/0012-9658\(2006\)87\[1995:obdnoe\]2.0.co;2](https://doi.org/10.1890/0012-9658(2006)87[1995:obdnoe]2.0.co;2)

Potts, S.G., Biesmeijer, J.C., Kremen, C., Neumann, P., Schweiger, O., & Kunin, W.E. (2010). Global pollinator declines: trends, impacts and drivers. *Trends Ecol. Evol.*, 25(6): 345-353. <http://doi:10.1016/j.tree.2010.01.007>

Rada, S., Schweiger, O., Harpke, A., Kühn, E., Kuras, T., Settele, J., & Musche, M. (2019). Protected areas do not mitigate biodiversity declines: A case study on butterflies. *Divers. Distrib.*, 25(2): 217-224. <https://doi.org/10.1111/ddi.12854>

Ramalho, A.V., Gaglianone, M.C., Oliveira, M.L. (2009). Comunidades de abelhas Euglossina (Hymenoptera: Apidae) em fragmentos de Mata Atlântica no Sudeste do Brasil. *Rev. Bras. Entomol.*, 53(1): 95– 101.

Ramírez, S.R., Dressler, R.L., & Ospina, M. (2002). Abejas Euglossinas (Hymenoptera: Apidae) de la Región Neotropical: Listado de especies con notas sobre su biología. *Biota Colomb.*, 3(1): 7-118.

Rasmussen, C. (2009). Diversity and abundance of orchid bees (Hymenoptera: Apidae, Euglossini) in a tropical rainforest succession. *Neotrop. Entomol.*, 38(1): 66-73. <http://dx.doi.org/10.1590/S1519-566X2009000100006>

Ricklefs, R.E., Adams, R.M., & Dressler, R.L. (1969). Species diversity of *Euglossa* in Panama (Hymenoptera: Apidae). *Ecology*, 50(4): 713-716. <http://doi:10.2307/1936265>

Rosenzweig, M.L. (1995). *Species diversity in space and time*. Cambridge University Press. Cambridge, England. 11-117 pp.

Roubik, D.W., Ackermann, J.D. (1987). Long-term ecology of euglossine orchid-bees (Apidae: Euglossini) in Panama. *Oecologia*, 73(3): 321–333. <https://doi:10.1007/BF00385247>

Roubik, D.W. (2001). Ups and downs in pollinator: when is there a decline?. *Conserv. Ecol.*, 5(1):2. <http://www.consecol.org/vol5/iss1/art2/>

Roubik, D.W. & Hanson, P.E. (2004). *Orchid bees of tropical America: Biology and Field Guide*. Instituto Nacional de Biodiversidad, Inbio, Heredia, Costa Rica. 370 pp.

Roubik, D.W., Basset, Y., Lopez, Y., Bobadilla, R., Perez, F. & Ramírez S, J. A. (2021). Long-term (1979-2019) dynamics of protected orchid bees in Panama. *Conservation Science and Practice*, 3(12), e543. <https://doi.org/10.1111/csp2.543>

Sánchez-Bayo, F., & Wyckhuys, K.A. (2019). Worldwide decline of the entomofauna: A review of its drivers. *Biol. Conserv.*, 232: 8-27. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2019.01.020>

Santos, A., & Añino, Y.J. (2016). Contribución al conocimiento de la diversidad de abejas de las orquídeas (Apidae: Euglossini) de la Península de Azuero, Panamá. *Tecnociencia*, 18(2): 45-58.

Silva, F.S., & Rebêlo, J.M. (2002). Population dynamics of Euglossinae bees (Hymenoptera, Apidae) in an early second-growth forest of Cajual Island, in the state of Maranhão, Brazil. *Braz. J. Biol.*, 62(1): 15-23. <http://dx.doi.org/10.1590/S1519-69842002000100003>

Silveira, F.A., Melo, G.A.R., Almeida, E.A.B. (2002). *Abelhas brasileiras: sistemática e identificação*. Edioria Composição e Arte, Belo Horizonte, Brazil. 253 pp.

Vanbergen, A.J. (2013). Threats to an ecosystem service: pressures on pollinators. *Front Ecol. Environ.*, 11(5): 251–259. <https://doi.org/10.1890/120126>

Van Klink, R., Bowler, D.E., Gongalsky, K.B., Swengel, A.B., Gentile, A., & Chase, J.M. (2020). Meta-analysis reveals declines in terrestrial but increases in freshwater insect abundances. *Science*, 368(6489): 417-420. <https://doi:10.1126/science.aax9931>

Vega-Hildago, Á., Añino, Y., Krichilsky, E., Smith, A.R., Santos-Murgas, A., & Gálvez, D. (2020). Decline of native bees (Apidae: Euglossa) in a tropical forest of Panama. *Apidologie*, 1-13. <https://doi.org/10.1007/s13592-020-00781-2>


Williams, N.H. & C.H. Dodson, C.H. (1972). Selective attraction of male euglossine bees to orchid floral fragrances and its importance in long distance pollen flow. *Evolution*, 26(1): 84-95. doi: 10.2307/2406985


Willmer, P. (2012). Ecology: pollinator–plant synchrony tested by climate change. *Curr. Biol.*, 22(4): R131-R132. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2012.01.009>




ABUNDANCIA Y DIVERSIDAD DE AVES PLAYERAS EN LA PLAYA EL AGALLITO, DISTRITO DE CHITRÉ, PROVINCIA DE HERRERA

Koraima Tejada¹, Aideth González², Esther Carty³, Félix Camarena⁴

¹Universidad de Panamá, Panamá. koraima210599@gmail.com 

²Sociedad Audubón, Panamá. aidethgonzalez741@gmail.com 

³Universidad de Panamá, Departamento de Ciencias Ambientales, Chitré, Provincia de Herrera, Panamá. scarty@audubonpanama.org 

⁴Universidad Especializada de las Américas (UDELAS), Facultad de Biociencia y Salud Pública, Instituto Coronel Segundo de Villarreal, Barriada La Heroica, La Villa de Los Santos, Panamá. felix.camarena@up.ac.pa felix.camarena.1@udelas.ac.pa 

Fecha de recepción: 21 de septiembre de 2022

Fecha de aceptación: 19 de octubre de 2022

RESUMEN

Se determinó la abundancia y diversidad de aves playeras en la playa El Agallito entre septiembre de 2021 y abril de 2022, con una observación mensual, de acuerdo con la amplitud de la marea, por un periodo de 2 horas. Los avistamientos se segmentaron en tres ciclos: estación lluviosa, de septiembre a noviembre, de diciembre a inicios de marzo estación seca y de finales de marzo a abril estación seca. Se reportó una cantidad de 10 542, 17 898 y 914 individuos respectivamente; distribuidos en tres familias: Scolopacidae en el periodo otoñal con 63 %, Charadriidae en el invernical con 53,92 % y Haematopodidae en la estación otoñal con 0.79 % fueron las familias más abundantes respectivamente. Dentro de nuestro análisis estadístico más representativo la abundancia es baja referente a el índice de Berger Parker para nuestras tres estaciones; en cuanto a nuestra diversidad por el contrario fue alta con el índice anteriormente mencionado. Las disminuciones de las aves en las playas de Azuero deben llevarnos a tomar conciencia e implementar proyectos para mejorar los espacios y la conexión de hábitat en su ruta de migración.

PALABRAS CLAVES

Bandadas, Ecosistema, Humedales, Invernación, playeros.

ABUNDANCE AND DIVERSITY OF SHOREBIRD AT EL AGALLITO BEACH, DISTRICT OF CHITRÉ, PROVINCE OF HERRERA

ABSTRACT

The abundance and diversity of shorebirds on El Agallito beach was determined between September 2021 and April 2022, with a monthly observation, according to the amplitude of the tide, for a period of 2 hours. The sightings were segmented into three cycles: the rainy season, from September to November, the dry season from December to the beginning of March, and the dry season from the end of March to April. An amount of 10,542, 17,898, and 914 individuals, respectively, was reported; distributed in three families: Scolopacidae in the autumn period with 63%, Charadriidae in the winter with 53.92% and Haematopodidae in the autumn season with 0.79% they were the most abundant families, respectively. Within our most representative statistical analysis, abundance is low in relation to the Berger Parker index for our three stations; In terms of our diversity, on the contrary, it was high with the aforementioned index. The decreases in birds on the beaches of Azuero should lead us to become aware and implement projects to improve spaces and habitat connection on their migration route.

KEYWORDS

Ecosystem, Flocks, shorebirds, Wetlands, Wintering.

INTRODUCCION

La migración es un comportamiento ampliamente extendido entre las aves, debido a la extraordinaria capacidad de desplazamiento y eficiencia que supone el vuelo como forma de locomoción. Aproximadamente la mitad de las especies de aves del mundo realizan migraciones anuales (Onrubia, 2015).

En la estación primaveral y otoñal las aves migratorias visitan los humedales año tras año debido a que presentan características ideales en cuanto a el sustrato areno- fangoso, áreas abiertas para reproducirse (Senner et al. 2017). En cuanto a las fases migratoria e invernal en los ciclos de vida de las aves han sido poco apreciadas. Dado que las aves con frecuencia presentan patrones complejos de migración, incluye las diferencias por edad y sexo en sus movimientos y distribución geográfica (Galindo, 2003).

Las condiciones ambientales de los lugares que frecuentan las aves playeras como lo comenta Giner & Pérez (2016) presentan características diferentes que las hacen únicas y hacen posible que las aves logren reponer energía, alimentarse y así poder seguir su migración, están presentes en hábitats de pastizal, humedales, playas y tundra de todo el mundo (Senner et al. 2017).

Uno de los aspectos más interesantes de estas aves son las largas migraciones, en las que pueden recorrer miles de kilómetros, además son cosmopolitas, las que presentan mayor índice de migración con la finalidad de encontrar las condiciones óptimas para la alimentación y reproducción, ya que en sus lugares de origen el ambiente a dejado de ser adecuado debido a la estación que se encuentran (Villarreal, 2010).

Panamá es una nación rica en biodiversidad, su posición geográfica crea un puente en la ruta migratoria de miles de aves. Se estima que alrededor de 177 especies de aves migratorias pasan regularmente por nuestra nación, ya que los diferentes tipos de hábitats les brindan refugio y alimento durante su estadía o paso por el país (Ministerio de Ambiente, 2021).

La Bahía Parita es una de las áreas de humedal de mayor biodiversidad y productividad biológica de Panamá (Centro Regional Ramsar para el hemisferio Occidental et al. 2010). La Playa el Agallito, es una de las tres playas con las que cuenta la ciudad de Chitré y es la más afectada por las actividades que realiza el hombre como se puede apreciar en su historia desde hace muchos años y en la actualidad aún se ve afectada. El sitio conocido como playa El Agallito no es una playa como tal, sino un humedal marino costero lo cual favorece grandemente, ya que, este tipo de sitios son uno de los ecosistemas favoritos de las aves playeras (Barrios & Delgado, 2015).

Las aves playeras son el estímulo para estructurar planes de conservación de estas especies y sus hábitats; en el año 2006 se realizó un encuentro donde recogió a los ornitólogos de todas partes del mundo celebrado en la ciudad de Villavicencio (departamento del Meta - Colombia), en este congreso la Asociación Calidris propone un Plan de Conservación de Playeros para ésta nación; al igual en Panamá la Sociedad Audubón realiza múltiples proyectos y censos anuales para ayudar a difundir el conocimiento del estado y conservación de las áreas importantes para las aves asociadas a Panamá (Ruíz et al.2008; Audubón, 2017).

El objetivo de nuestro estudio en la Playa El Agallito es lograr observar, identificar y estudiar la diversidad de aves playeras que utilizan este ecosistema marino costero.

MATERIALES Y METODOS

Característica y ubicación del área

La playa El Agallito fue creada en 1967 artificialmente, en donde se eliminaron más de 400 metros de la franja del manglar que se encontraban a las riberas del río La Villa. Es por eso que hoy podemos observar una gran cantidad de mangles que separan la playa de tierra firme (Barrios & Delgado, 2015).

La Playa El Agallito se ubica en la vertiente pacífica del Istmo de Panamá, al Noreste de la península de Azuero, administrativamente pertenece al Distrito de Chitré, en la provincia de Herrera, República de Panamá (8°00'N-80°24'W) (Barrios & Delgado, 2015) "El Agallito" toma su nombre de este singular árbol que crece en las costas Chitreanas y cuyo fruto se llama agalla, el cual se utiliza para curtir en las tenerías que existen en la región. El sustrato areno- fangoso del puerto es el hogar de este árbol que, aunque pequeño, tiene una sombra cómoda que los visitantes usan para protegerse del sol abrasador (Autoridad Marítima de Panamá, 2015).

El sitio se ubica ecológicamente en la zona de vida de la selva seca premontana con precipitación anual promedio de 1 250 mm, está representada en el sector marino-costero por asociaciones vegetativas de tipo manglar como mangle negro (*Avicennia germinans*), mangle rojo (*Rhizophora mangle*), mangle blanco (*Laguncularia racemosa*), mangle botón (*Conocarpus erectus*), matorral costero con *Prosopis sp*, *Caesalpinia sp* y *Arthocereus sp*. Hay una franja de manglar de unos 150 metros de ancho que separa la playa abierta de los salares o albinas del distrito y la tierra firme. La zona de estudio, que pertenece a Bahía de Parita, es reconocida como sitio importante para las aves playeras migratorias e invernantes (Barrios & Delgado, 2015).

El área de estudio comprende las coordenadas N 08°00.0787' W 080°24.2091", proporcionado por un GPS Garmin INSTINCT (Figura 1). Los monitoreos se realizaron una vez al mes, a dos o tres horas antes de la pleamar o después de la bajamar, entre los meses de septiembre a noviembre, período que comprende la migración otoñal (norte-sur), de

diciembre a inicios de marzo; que incluye los residentes invernales (especies que hacen su estadía migratoria en el sitio) y finales de marzo a abril, la migración primaveral (sur-norte).



Fig. 1. Área de estudio: Orilla de la Playa el Agallito. Fuente: Google Earth. Escala 1:70 m

Materiales y monitoreos.

Para las observaciones de las aves playeras se utilizaron binoculares Multi Coated 10X42 y telescopios marca KOWA 20-60XS y Swarovski 60x , con apoyo de la Sociedad Audubón de Panamá y la guía de campo The Birds of Panama (Angehr & Dean, 2010), la Guía de las aves de

Panamá que incluye Costa Rica, Nicaragua y Honduras (Ridgely & Gwynne, 1993) y se complementó la información con las plataformas de Ciencias Ciudadanas eBird y Merlin (The Cornell Lab of Ornithology, 2021) que facilitó la identificación de las especies de aves playeras. La duración en cada monitoreo dependía de acuerdo con la cantidad de aves playeras en el sitio y las condiciones de las mareas.

Durante los monitoreos en la Playa El Agallito realizamos el conteo de *Calidris pusilla*/ *Calidris mauri* juntos ya que son aves playeras pequeñas muy difíciles de contar, cuando están en bandadas, a estas dos especies convencionalmente se le llama aves playeras pequeñas, que es un término utilizado por Sociedad Audubón Panamá y utilizado en la

investigación Monitoring winter shorebird populations in the Bay of Panama: 2013–2017-

Las tres aves playeras pequeñas más abundantes (El playero occidental, el playero semipalmeado y el chorlo semipalmeado) no se pudieron diferenciar en grandes bandadas y se registraron en el campo como playeras pequeñas” Kaufmann et al. (2018).

Análisis estadístico

Para realizar el análisis estadístico se utilizó una prueba de Kruskal Wallis para determinar la abundancia entre meses, U de Mann-Whitney para la diferencia de abundancia, rutina ANOSIM y nMDS para determinar diferencias de diversidad entre las estaciones y la prueba de Shannon-Winner, para comparar la diferencia de diversidad entre las estaciones se realizó la prueba t de Hutcheson, con el paquete estadístico de Past 4.03, con el cual se hizo una comparación, tanto de la abundancia como diversidad, entre las temporadas otoñal, invernal y primaveral.

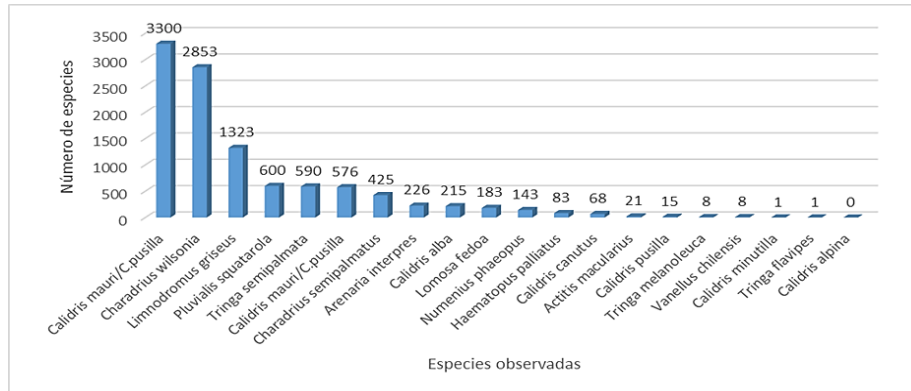
RESULTADOS

En la presente investigación se observaron 10 542 individuos reportados por 17 especies, incluidas en tres familias (Cuadro 1).

Cuadro 1. Diversidad de aves playeras en la playa El Agallito por estación: Otoñal (OTO), Invernal (INVR) Y Primavera (PRIMV) durante los años 2021 y 2022.

Orden	Familia	Especie	Estación
Charadriiformes	Scolopacidae	<i>Numenius phaeopus</i>	OTO, INV Y PRIMV
		<i>Limosa fedoa</i>	OTO, INV
		<i>Arenaria interpres</i>	OTO, INV Y PRIMV
		<i>Calidris canutus</i>	OTO, INV Y PRIMV
		<i>Calidris alba</i>	OTO, INV Y PRIMV
		<i>Calidris alpina</i>	INVR
		<i>Calidris pusilla/ Calidris mauri</i>	OTO, INV Y PRIMV
		<i>Limnodromus griseus</i>	OTO E INVR
		<i>Actitis macularius</i>	OTO, INV Y PRIMV
		<i>Tringa flavipes</i>	OTO, INV Y PRIMV
		<i>Tringa melanoleuca</i>	OTO E INVR
		<i>Tringa semipalmata</i>	OTO, INV Y PRIMV
		Charadriiformes	Charadriidae
<i>Charadrius semipalmatus</i>	OTO, INV Y PRIMV		
<i>Charadrius wilsonia</i>	OTO, INV Y PRIMV		
<i>Vanellus chilensis</i>	OTO		
Charadriiformes	Haematopodidae	<i>Haematopus palliatu</i>	OTO, INV Y PRIMV

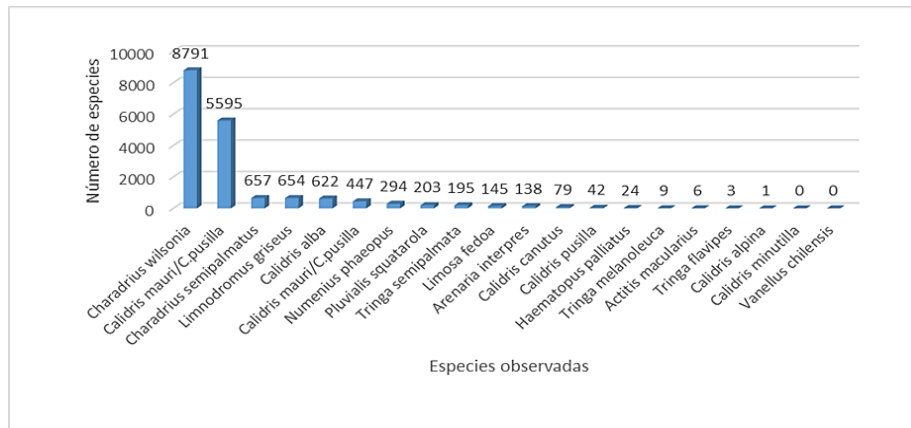
Las mayores abundancias de especies durante la estación otoñal fueron (*Calidris mauri/pusilla*) con 3 300 individuos, seguido de los *Charadrius semipalmatus* con 2 853 individuos y finalmente los *Limnodromus griseus* con 1 323 individuos respectivamente, las especies menos abundantes fueron *Calidris minutilla* y *Tringa flavipes* (Figura 2).



Fuentes: Aideth González y Koraima Tejada

Fig. 2. Consolidado de la diversidad y abundancia de aves playeras en la playa en Agallito en la estación otoñal del 2022.

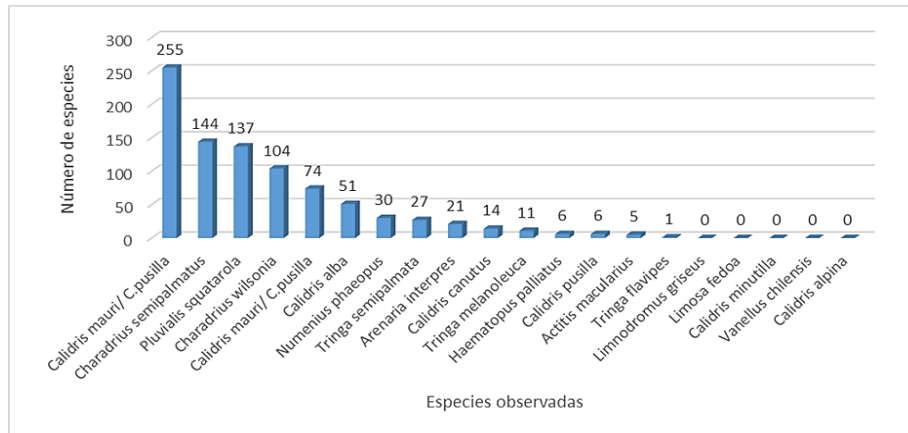
En la estación invernal se logró registrar la mayor abundancia de aves playeras de las especies *Charadrius wilsonia* con 8 791 individuos, seguido (*Calidris mauri/pusilla*) con 5 595 individuos y finalmente los *Charadrius semipalmatus* con 657 individuos respectivamente, la especie menos abundante fue *Tringa flavipes*, ya que, el *Calidris alpina* es una especie poco observada y catalogada como rara en la bahía de Parita (Fig.3).



Fuentes: Aideth González y Koraima Tejada

Fig.3 Consolidado de la diversidad y abundancia de aves playeras en la playa en Agallito en la estación invernal del 2022.

Durante la estación primaveral, las mayores abundancias de especies fueron (*Calidris mauri/pusilla*) con 255 individuos, seguido de los *Charadrius semipalmatus* con 144 individuos y finalmente *Pluvialis squatarola* con 137 individuos respectivamente, la especie con menos abundancia fue *Tringa flavipes* (Fig. 4).



Fuentes: Aideth González y Koraima Tejada

Fig.4. Consolidado de la diversidad y abundancia de aves playeras en la playa en Agallito en la estación primaveral del 2022

ANALISIS ESTADISTICO

A continuación, presentamos los análisis estadísticos de nuestro estudio: No existe diferencia significativa de la abundancia de aves playeras entre otoño e invierno (Cuadro 2).

Cuadro 2. Análisis estadístico U de Mann-Whitney entre otoño e invierno.

Tests for equal medians		No existe diferencia significativa OTO-INV	
A	B		
N:	20	N:	20
Mean rank:	10,375	Mean rank:	10,125
Mann-Whitn U :	195		
z :	0,12178	p (same med.):	0,90308
Monte Carlo permutation:	p (same med.):	0,9003	

Cuadro 3. Análisis estadístico U de Mann- Whitney entre invierno y primavera.

Tests for equal medians		Existe diferencia significativa entre INV-PRIM	
B	C		
N:	20	N:	18
Mean rank:	12,171	Mean rank:	7,3289
Mann-Whitn U :	107,5		
z :	2,1078	p (same med.):	0,035046
Monte Carlo permutation:	p (same med.): 0,0328		

Sin embargo, se presentó diferencia significativa de la abundancia entre primavera y otoño (Cuadro 4).

Cuadro 4. Análisis estadístico U de Mann- Whitney entre primavera y otoño.

Tests for equal medians		Diferencia significativa entre PRIM-OTO Abundancia	
C	D		
N:	18	N:	20
Mean rank:	7,1053	Mean rank:	12,395
Mann-Whitn U :	99		
z :	2,3556	p (same med.):	0,018491
Monte Carlo permutation:	p (same med.): 0,0162		

La abundancia mensual presentó diferencias significativas, de acuerdo con la prueba de Kruskal Wallis (Cuadro 5).

Cuadro 5. Prueba de Kruskal- Wallis para la diferencia entre los meses.

H (chi2):	16,41
Hc (tie corrected):	16,67
p (same):	0,03379

Éstas diferencias de acuerdo a la prueba de Dunn se presentaron entre septiembre y marzo, septiembre y abril, octubre y marzo, octubre y abril, entre enero y marzo (Cuadro 6)

Cuadro 6. Prueba de Dunn para saber los meses que tienen diferencias.

Diferencia de meses prueba de Dunn									
	Sept.	Oct.	Nov.	Dic.	Enero	Feb.	Marzo	Marzo	Abril
Septiembre		0,7338	0,9434	0,4901	0,6689	0,1763	0,0156 5	0,0156 5	0,0241 2
Octubre	0,7338		0,7879	0,7263	0,9303	0,3115	0,0378 1	0,0378 1	0,0554 8
Noviembre	0,9434	0,7879		0,5359	0,7214	0,2002		0,0189 8	0,0289 5
Diciembre	0,4901	0,7263	0,5359		0,7929	0,508	0,0841 9	0,0841 9	0,1176
Enero	0,6689	0,9303	0,7214	0,7929		0,3552	0,0466 6	0,0466 6	0,0676 1
Febrero	0,1763	0,3115	0,2002	0,508	0,3552		0,2869	0,2869	0,3665
Marzo	0,0156 5	0,0378 1	0,01898	0,08419	0,0466 6	0,2869			1 0,8715
Marzo	0,0156 5	0,0378 1	0,01898	0,08419	0,0466 6	0,2869	1		0,8715
Abril	0,0241 2	0,0554 8	0,02895	0,1176	0,0676 1	0,3665	0,8715	0,8715	

Análisis estadístico de Shannon Winner entre otoño e invierno.

El índice de diversidad de Shannon Winner fue alto en otoño e invierno y presentó diferencia altamente significativa de acuerdo con la prueba de Hutchenson en dónde la t: 37,809. Para estación otoñal se obtuvo un valor de H: 1,97 e Inviernal H: 1,46.

Análisis de Shannon Winner entre invierno y primavera.

El índice de diversidad de Shannon Winner fue bajo entre la estación invernal y primaveral y presentó diferencias significativas de acuerdo

con la prueba de Hutchenson el cual nos dio un valor de t: -20,43. En cuanto a la estación invernal obtuvimos una H: 1,46 y primaveral una H: 2,11.

Análisis estadístico de Shannon Winner entre primavera y otoño.

El índice de diversidad de Shannon Winner fue alto entre la estación primaveral y otoñal y presentó diferencia significativa de acuerdo con la prueba de Hutchenson con un valor de t: 4,27. En la estación primaveral una H: 2,11 y Otoñal H: 1,97.

La diferencia está altamente significativa ya que en ella se encuentra la suma total de las especies por meses pertenecientes a cada estación.

El índice de Equitatividad de Pielou indicó valores intermedios entre 0,4973 y 0,7629 (Cuadro 10).

Cuadro 10. Índices de diversidad.

	OTO	INV	PRIMV
Taxa_S	20	19	16
Individuals	10640	17907	889
Dominance_D	0,1958	0,3438	0,1593
Simpson_1-D	0,8042	0,6562	0,8407
Shannon_H	1,978	1,464	2,115
Evenness_e^H/S	0,3614	0,2276	0,5183
Brillouin	1,973	1,461	2,076
Menhinick	0,1939	0,142	0,5366
Margalef	2,049	1,838	2,209
Equitability_J	0,6602	0,4973	0,7629
Fisher_alpha	2,379	2,099	2,771
Berger-Parker	0,3102	0,4909	0,2868
Chao-1	23	19	16

La prueba de ANOSIM mostró similitud con cierto grado de diferencia en diversidad mensual (Cuadro 11).

Cuadro 11. Análisis de ANOSIM

ANOSIM	
Permutation	
N:	9999
Mean rank within:	15,8
Mean rank between:	19,54
R:	0,2077
p (same):	0,1552

A continuación, se presenta la similaridad con cierto grado de diferencias mensuales en la figura de la prueba de análisis multidimensional no métrico entre invierno y otoño, pero cierta semejanza entre invierno y primavera. Stress: 0,0503. (Figura 5).

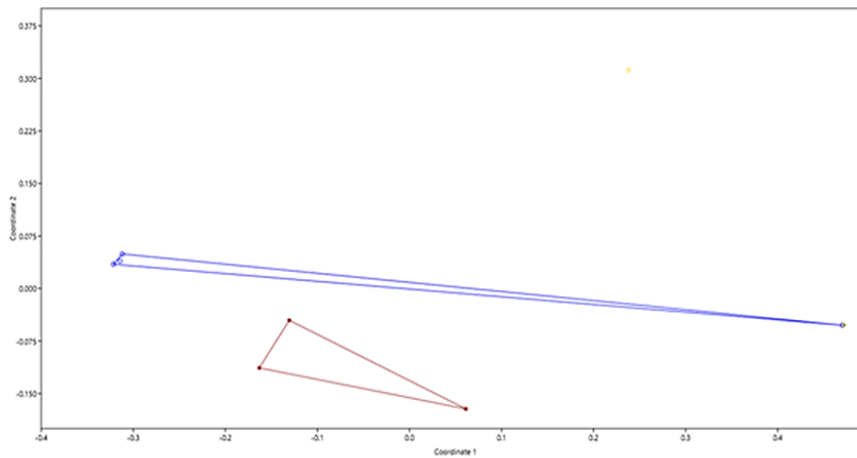


Fig.5. Análisis nMDS sobre la similaridad entre estaciones.

En la Fig. 6, presentamos el Análisis de conglomerado:

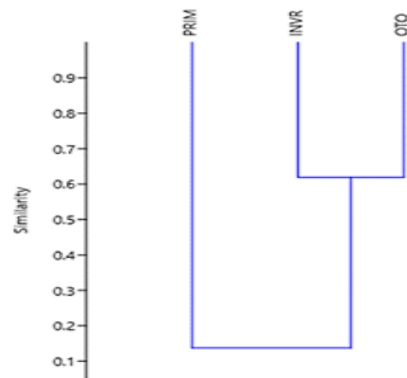


Fig. 6. Análisis de conglomerado de acuerdo con el método de Ward y la distancia de Bray Curtis de relación entre la similaridad y la abundancia entre estaciones.

DISCUSIÓN

En el presente estudio se pudieron observar un total de 29 430 individuos, los cuales estaban divididos en tres familias: Scolopaciade (53 %), Charadriidae (46 %) y Haematopodidae (0,38 %); siendo éste porcentaje el total de las tres estaciones por familia, este resultado difiere del estudio realizado por Rodríguez & Díaz, (1996) en la Playa El Agallito octubre 1993 a marzo de 1994; Scolopacidae (90,9 %), Charadriidae (7,9 %) y Haematopodidae (0.9 %) siendo un total de 68 092 individuos, en dónde se observa una cantidad mucho mayor a nuestros resultados. Todo lo anterior sustenta que un gran número de estas aves migratorias de Norteamérica se desplazan hacia Suramérica cuando inicia el periodo otoñal (septiembre-noviembre) y regresan en el periodo primaveral (febrero a marzo) a las regiones de anidación (Rodríguez & Díaz, 1996).

La principal migración del chorlo gris (*Pluvialis squatarola*) llega desde el norte en septiembre y principios de octubre, la mayoría de estos se regresan en abril y se observan principalmente a lo largo de la costa del Pacífico, particularmente alrededor de las costas de la Bahía de Parita.

Los chorlos semipalmados se pueden encontrar en grandes bandadas a fines de marzo y abril cuando las aves están en su camino hacia el norte Wetmore et al. (1965) coincide con el presente estudio en cuanto a la abundancia de estas especies para los mismos meses.

De acuerdo con los monitoreos realizados se puede observar una disminución considerable en la abundancia de las aves marzo y abril, por lo que se considera que estos son los meses propuestos para la migración primaveral, lo que coincide con Mendoza et al. (2012) quienes indican que la disminución de la abundancia entre marzo y abril se relaciona con la partida de individuos del área de estudio hacia sus sitios de reproducción.

Durante los meses de la presente investigación se registró la ausencia de *Haematopus palliatus* durante la estación invernal (diciembre-marzo), en el estudio realizado por Rodríguez & Azpiroz,

(2004) mencionan que en este periodo se registran los meses de reproducción de estas especies en Panamá, lo cual justifica la razón del porqué de la ausencia de esta especie.

Abundancia aves playeras en la playa el Agallito.

La abundancia fue mayor en la estación invernal en donde el índice de Berger Parker resultó bajo y difiere en comparación con la investigación llevada a cabo por Pérez, (2010) quien estudió diferentes áreas en Panamá como: Costa del Este en enero (Dbp: 0,97), para Panamá viejo en abril (Dbp: 0,53), Avenida Balboa y áreas aledañas en febrero (Dbp: 0,77) en base al criterio de (Ridgely & Gwynne, 1993). La abundancia obtenida en el análisis estadístico refleja que existe una diferencia significativa a lo largo de los meses, en donde se obtuvo un pico máximo en octubre y febrero. El estudio realizado por Guerra, (2004), coincide con nuestros resultados en el cual obtuvo que el número de individuos varió significativamente a lo largo de los meses ($H = 20,90480$ $p = 0,0131$) en donde hubo dos picos máximos de abundancia en septiembre y febrero.

Diversidad de aves playeras en la playa el Agallito.

En las tres estaciones de estudio los resultados de diversidad son similar a la investigación realizado por Pérez et al. (2016) los cuales proporcionaron un resultado con una diversidad baja de aves playeras (Dmg: 1.55) (Margalef,1951).

La disminución de la diversidad se les atribuye a los cambios producidos por el hombre como: contaminación producida por plástico, vidrios, metales, entre otros y a las perturbaciones que hay en la zona, ya sean antropogénicas ocasionadas por pescadores, ruido del motor de los buses del Agallito o naturales (perros, halcones, algún otro tipo de animales) (Pérez et al. 2016; González, 2020; Pérez, 2010)

Los resultados del índice de Margalef difieren del estudio de Pérez, (2010), realizado de enero a junio de 2007 en la Avenida Balboa y áreas aledañas (Dmg: 5,98), Panamá Viejo (Dmg: 4,80) y Costa del este (Dmg: 4,11), los resultados de este autor son más elevados que los obtenidos en la presente investigación debido a la mayor cantidad de muestreos que se realizaban en cada localidad.

En cuanto a la estación Invernal, de diciembre a marzo, los resultados guardan similitud con los resultados de Pérez, (2010) quien, en su estudio, realizado en Panamá Viejo durante enero y abril, presentó valores de Dbp: 0,40; 0,53 respectivamente.

CONCLUSIONES

En el presente estudio se identificaron 17 especies, de las cuales, 13 de la familia Scolopacidae, 3 Charadriidae y 1 Haematopodidae.

El total de aves observadas fue de 29 354 individuos, la especie más abundantes estuvo compuesto por (*Calidris mauri/ pusilla*). En la estación otoñal se registró 10 542 individuos representados por: 63 % de Scolopacidae, 36 % de Charadriidae y 0,79 % de Haematopodidae; durante la estación invernal se observaron 17 898 individuos, 45,94% de Scolopacidae, 53,92 % de Charadriidae y 0,13 % Haematopodidae. En la estación primaveral se registró 914 individuos, 57,22 % de Scolopacidae, 42,12 % de Charadriidae y 0,66 % Haematopodidae.

La prueba estadística indicó que no existe diferencia significativa entre la estación otoñal e invernal; mientras que existe diferencia significativa entre la invernal y primaveral y la primaveral y otoñal. La diferencia mensual observada se obtuvo entre marzo y los meses de septiembre, octubre, noviembre, enero respectivamente y diferencias entre diciembre y febrero. El dendograma mostró similaridad entre las estaciones invernal y otoñal, no así con la primaveral.

El índice de diversidad resultó diferente entre todas las estaciones, sin embargo, el análisis ANOSIM indicó que hay similaridad con cierto grado de diferencia que se observó entre invierno-otoño y semejanzas entre invierno-primavera de acuerdo con el análisis multidimensional no métrico.

AGRADECIMIENTO

Agradecemos a nuestro asesor de tesis Félix H. Camarena Q. por habernos brindado la oportunidad de recurrir a nuestras capacidades y conocimientos científicos, así como también habernos tenido toda la paciencia del mundo para guiarnos durante todo el desarrollo de la tesis.

A Ítalo Goti nuestro profesor Coordinador de facultad de Ciencias Naturales Exactas y Tecnología que siempre nos apoyó, y logró potenciar esas habilidades adquiridas en los cursos que nos impartió, para lograr este excelente trabajo.

Manifestamos profundos agradecimientos a La Sociedad Audubon Panamá, quienes nos adoptaron como parte de su equipo, nos brindaron su apoyo, tiempo, experiencia y asesorías para lograr identificar y conocer más sobre el mundo de las aves playeras en la Bahía de Parita.

Y a todos los que de una forma u otra nos ayudaron a formarnos en este maravilloso mundo de las ciencias y en especial de la ornitología.

REFERENCIAS

Angehr, G. R., & Dean, R. (2010). *The Birds of Panama*. New York: Comstock Publishing Associates, Cornell University Press.

Audubón, P. (2017). Plan de Conservación para los Humedales de la Bahía de Panamá. Recuperado el 3 de Diciembre de 2021

Autoridad Marítima de Panamá. (11 de octubre de 2015). Autoridad Marítima de Panamá. Recuperado el 1 de abril de 2022, de <https://amp.gob.pa/noticias/puerto-el-agallito-celebra-su-cuarto-aniversario/>

Autoridad Marítima de Panamá. (2015). Puerto el Agallito celebra su cuarto aniversario. Recuperado el 7 de Noviembre de 2021

Barrios, H., & Delgado Botello, F. (2015). Migración invernal de Mariposas en la Playa El Agallito, Chitré, Herrera, Panamá. *Scientia*, Vol 25(2), 15-33.

Buheler, D. M., Castillo, A. I., & Angehr, G. (2004). Shorebird counts in the Upper Bay of Panama highlight the importance. *Wader Study Group Bull*, 56.

CREHO, Mi Ambiente, & Universidad Marítima de Panamá. (2010). Manejo de humedales como enfoque de comunicación y participación pública. Panamá.

Galindo Espinosa, D. (2003). Uso de dos humedales, dulceacuícola y costero, por *Calidris mauri* (Charadriiforme: Scolopacidae) al sur de la Península de Baja California, México. *Cicimar*, 1-3.

Kaufmann, K., Miró, R., Díaz, Y., Caballero, M., & Carty, S. (2018). Monitoring winter shorebird populations in the Bay of Panama. research paper, 98.

MiAmbiente. (2021). Panamá: Paso obligatorio de 177 especies de aves migratorias. Recuperado el marzo de 2022.

Ministerio de Ambiente. (2021). Noticias Nacionales, sala de prensa. Recuperado el 1 de enero de 2022.

Morrison, R., Gill, R., Harrington, J. B., Skagen, S., Page, G., Grator-Trevor, C., & Haig, S. (2000). Estimaciones de población de aves playeras del Neártico. *Revista internacional de biología de aves acuáticas*, Vol 23(3), 16.

Onrubia Baticón, A. (2015). Patrones espacios- temporales de la migración de aves planeadoras en el estrecho de Gibraltar. Universidad de León, 1-7.

Pérez A, R. J., Tejera N, V. H., & Jiménez M, A. M. (2016). Distribución Espacial de Aves Migratorias en la Zona Costera de Costa del Este, Ciudad de Panamá. *Tecnociencia*, Vol.18(2), 21-33.

Pérez Arosemena , R. J. (2010). Diversidad, distribución y Etología de la Avifauna en la Zona Costera de la Ciudad de Panamá. Vicerrectoría de Investigación y Posgrado, 533.

Ridgely, R. S., & Gwynne, J. A. (1993). Guías de las Aves de Panamá incluyendo Costa Rica , Nicaraguas y Honduras (1 ed.). Colombia: Imprelibros S.A.

Rodríguez Vargas, A. (2007). Biota Panamá. Recuperado el marzo de 2022.

Rodríguez Ferraro, A., & Azpiroz, A. B. (2004). Nidificación del caracolero (*Haematopus palliatus*) en la Península de Paraguaná, Venezuela. *Ornitología Neotropical*, 15, 269-270.

Rodríguez, L., & Díaz, M. E. (1996). Aves migratorias de la Bahía de Parita: Playas el Retén y El Agallito. CRUA Veraguas, 2-4.

Ruíz Guerra, C. J. (2004). Distribución espacio- Temporal y Comportamiento de Aves Playeras en el Parque Nacional Natural Sanquianga (Nariño, Colombia). Researchgate.net.

Angehr, G. R., & Dean, R. (2010). *The Birds of Panama*. New York: Comstock Publishing Associates, Cornell University Press.

Audubón, P. (2017). Plan de Conservación para los Humedales de la Bahía de Panamá. Recuperado el 3 de Diciembre de 2021

Autoridad Marítima de Panamá. (11 de octubre de 2015). Autoridad Marítima de Panamá. Recuperado el 1 de abril de 2022, de <https://amp.gob.pa/noticias/puerto-el-agallito-celebra-su-cuarto-aniversario/>

Autoridad Marítima de Panamá. (2015). Puerto el Agallito celebra su cuarto aniversario. Recuperado el 7 de Noviembre de 2021

Mariposas en la Playa El Agallito, Chitré, Herrera, Panamá. *Scientia*, Vol 25(2), 15-33.

Buheler, D. M., Castillo, A. I., & Angehr, G. (2004). Shorebird counts in the Upper Bay of Panama highlight the importance. *Wader Study Group Bull*, 56.

CREHO, Mi Ambiente, & Universidad Marítima de Panamá. (2010). Manejo de humedales como enfoque de comunicación y participación pública. Panamá.

Galindo Espinosa, D. (2003). Uso de dos humedales, dulceacuícola y costero, por *Calidris mauri* (Charadriiforme: Scolopacidae) al sur de la Península de Baja California, México. *Cicimar*, 1-3.

Kaufmann, K., Miró, R., Díaz, Y., Caballero, M., & Carty, S. (2018). Monitoring winter shorebird populations in the Bay of Panama. research paper, 98.

MiAmbiente. (2021). Panamá: Paso obligatorio de 177 especies de aves migratorias. Recuperado el marzo de 2022.

Ministerio de Ambiente. (2021). Noticias Nacionales, sala de prensa. Recuperado el 1 de enero de 2022.

Morrison, R., Gill, R., Harrington, J. B., Skagen, S., Page, G., Grator-Trevor, C., & Haig, S. (2000). Estimaciones de población de aves playeras del Neártico. *Revista internacional de biología de aves acuáticas*, Vol 23(3), 16.

Onrubia Baticón, A. (2015). Patrones espacios- temporales de la migración de aves planeadoras en el estrecho de Gibraltar. *Universidad de León*, 1-7.

- Pérez A, R. J., Tejera N, V. H., & Jiménez M, A. M. (2016). Distribución Espacial de Aves Migratorias en la Zona Costera de Costa del Este, Ciudad de Panamá. *Tecnociencia*, Vol.18(2), 21-33.
- Pérez Arosemena , R. J. (2010). Diversidad, distribución y Etología de la Avifauna en la Zona Costera de la Ciudad de Panamá. *Vicerrectoría de Investigación y Posgrado*, 533.
- Ridgely, R. S., & Gwynne, J. A. (1993). *Guías de las Aves de Panamá incluyendo Costa Rica , Nicaragua y Honduras (1 ed.)*. Colombia: Imprelibros S.A.
- Rodríguez Vargas, A. (2007). *Biota Panamá*. Recuperado el marzo de 2022.
- Rodríguez Ferraro, A., & Azpiroz, A. B. (2004). Nidificación del caracolero (*Haematopus palliatus*) en la Península de Paraguaná, Venezuela. *Ornitología Neotropical*, 15, 269-270.
- Rodríguez, L., & Díaz, M. E. (1996). Aves migratorias de la Bahía de Parita: Playas el Retén y El Agallito. *CRUA Veraguas*, 2-4.
- Ruíz Guerra, C. J. (2004). Distribución espacio- Temporal y Comportamiento de Aves Playeras en el Parque Nacional Natural Sanquianga (Nariño, Colombia). *Researchgate.net*.
- Ruíz Guerra, C., Johnston González, R., Catillo Cortés, L. F., Cifuentes Sarmiento, Y., Eusse , D., & Estela , F. A. (2008). *Atlas de Aves Playeras y Otras Aves Acuáticas en la Costa Caribe Colombiana*. Asociación Calidris, Vol.77, 72.
- Senner, S., Andres, B., & Gates, R. (2017). *Estrategia de Conservación de las Aves Playeras* . New York.
- Tabilo Valdivieso, E. L. (2003). El Beneficio de los Humedales en la Región Neotropical. *Centro Neotropical de Entrenamiento en Humedales*, 81.
- The Cornell Lab of Ornithology. (2016). *Merlin* . Recuperado el 15 de Septiembre de 2021.

The Cornell Lab of Ornithology. (2018). Ebird. Recuperado el 15 de Septiembre de 2021.

Villarreal Orias , J. (2010). Uso de hábitat diferencial de aves playeras migratorias (Charadriiformes) en la costa oeste de la península de Nicoya, Costa Rica. Dialnet, 14(1), 13.

Villarreal Orias, J. (2010). Uso de hábitat diferencial de aves playeras migratorias (Charadriiformes) en la costa oeste de la península de Nicoya, Costa Rica. Dialnet, 1-3.

Wetmore, A., Pasquier, R., Olson, S., & Siegel , D. (1965). The Birds of the Republic of Panama.

Winn, Brad, Guilfoyle, M., & Walker , W. (2019). Medios para la implementación de técnicas mejoradas para el manejo de sedimentos costeros en beneficio. En S. A. Panamá (Ed.), 8va Reunión del Grupo de Aves Playeras del Hemisferio Occidental (pág. 216). Panamá.


Yates, M., Goss- Custard, J., McGrorty, S., & Lakhani, K. (1993). Características de los sedimentos, densidades de invertebrados y densidades de aves playeras en las orillas internas del arroyo. Revista de Ecología Aplicada, Vol 30(4), 16.



CARACTERÍSTICAS DE LA ANIDACIÓN DE TORTUGAS MARINAS: *Lepidochelys olivacea* y *Chelonia mydas*, EN PLAYA LAGARTO, LOS SANTOS, PANAMÁ

Roberto C. Lombardo^{1,2}, Deikel Y. Saavedra²

¹Centro de Capacitación, Investigación y Monitoreo de la Biodiversidad en el Parque Nacional Coiba CCIMBIO, Panamá roberto.lombardo@up.ac.pa 

²Universidad de Panamá, Centro Regional Universitario de Veraguas, Departamento de Biología Marina y Limnología, Panamá. deikelsaavedra@gmail.com 

Fecha de recepción: 23 de julio de 2022

Fecha de aceptación: 18 de octubre de 2022

RESUMEN

El presente trabajo tuvo como objetivo determinar las características de la anidación de tortugas marinas en Playa Lagarto y evaluar el éxito de nidos reubicados. De junio 2021 a enero 2022, se realizaron monitoreos nocturnos para coleccionar datos biométricos y reubicar nidos a un vivero local. Se identificaron 53 tortugas de la especie *Lepidochelys olivacea* que promediaron 67.90 cm de largo y 70.26 cm de ancho de caparazón. Se cuantificaron 38 tortugas *Chelonia mydas* cuyo caparazón promedió 90.18 cm de largo y 86.26 cm de ancho. Se reubicaron 116 nidos al vivero, de los cuales se liberaron 7,059 neonatos, alcanzando 72.68% de éxito de eclosión. Los neonatos promediaron 34.26 mm de ancho y 41.98 mm de largo de caparazón, y 15.39 g de peso. En la playa, se detectaron 16 nidos saqueados, 14 de *L. olivacea* y dos de *C. mydas*, mientras que cuatro fueron saqueados en el vivero. El saqueo en el vivero ascendió a 184 y 199 huevos para *L. olivacea* y *C. mydas*, respectivamente. Considerando los porcentajes de eclosión por especie, se estima que 239 neonatos fueron perdidos producto del saqueo. Es necesario fortalecer las estrategias de protección y conservación de estos importantes reptiles marinos.

PALABRAS CLAVES

Bermas, *Chelonia mydas*, caparazón, éxito de eclosión, *Lepidochelys olivacea*

NESTING CHARACTERISTICS OF THE SEA TURTLES: *Lepidochelys olivacea* AND *Chelonia mydas*, IN PLAYA LAGARTO, LOS SANTOS, PANAMA

ABSTRACT

The present work aimed to determine the characteristics of sea turtle nesting at Lagarto Beach and evaluate the success of relocated nests. Nocturnal monitoring was carried out from June 2021 to January 2022, to collect biometric data and relocate nests to a local nursery. A total of 53 *Lepidochelys olivacea* turtles were identified, which averaged 67.90 cm in length and 70.26 cm in carapace width. Thirty-eight *Chelonia mydas* turtles were quantified; whose carapace averaged 90.18 cm in length and 86.26 cm in width. In sum, 116 nests were relocated to the nursery, and their exhumation allowed the release of 7,059 hatchlings, reaching a 72.68% hatching success rate. Hatchlings averaged 34.26 mm in carapace width, 41.98 mm in carapace length, and 15.39 g in weight. On the beach, 16 nests were poached, 14 of *L. olivacea* and two of *C. mydas*, while four were poached in the hatchery. Poaching in the hatchery amounted to 184 and 199 eggs for *L. olivacea* and *C. mydas*, respectively. Considering the percentages of hatching by species, it is estimated that 239 hatchlings were lost as a result of egg poaching. It is necessary to further strengthen the protection and conservation strategies for these important marine reptiles.

KEYWORDS

Berms, *Chelonia mydas*, carapace, hatching success, *Lepidochelys olivacea*

INTRODUCCIÓN

Las tortugas marinas poseen el rango más amplio de distribución de los reptiles, desde el Ártico hasta Tasmania (Meylan & Meylan, 2000). Son parte fundamental de ecosistemas marino-costero tropicales donde desempeñan funciones críticas (Frazer, 1992; Meylan & Meylan, 2000). Sin embargo, las siete especies de tortugas marinas existentes se encuentran en la lista roja de animales amenazados de la UICN (Baillie & Groombridge, 1996).

La vulnerabilidad de estas especies se debe a un ciclo de vida con alta mortalidad (Reavis *et al.*, 2022). Desde la emergencia del nido son depredados por aves, cangrejos y peces, e incluso los adultos son atacados ocasionalmente por tiburones (Georges *et al.*, 1993; Heithaus *et al.*, 2008). La supervivencia de las tortugas marinas también está

influenciada por actividades antrópicas como: contaminación, pesca incidental, desarrollo turístico, saqueo y venta ilegal de huevos y carne de tortuga. Estas actividades han hecho que el número de individuos por especie disminuya (Marcovaldi & Thomé, 2000; Troëng & Rankin, 2005; Vega & Robles, 2007b; Garcés *et al.*, 2020; Reavis *et al.*, 2022).

En el caso específico de la tortuga verde, *Chelonia mydas*, en Michoacán, México, la población sufrió una drástica disminución luego de la explotación intensa entre 1960 y 1970, con una abundancia anual de hembras anidadoras que se redujo de aproximadamente 25,000 a un promedio de 1,400 entre 1982 y 2001 (Chassin-Noria *et al.*, 2004). Las tortugas lora, *Lepidochelys olivacea*, también ha sufrido declives poblacionales; a pesar de ser las más abundante de las tortugas marinas (Sosa-Cornejo *et al.*, 2021). En Costa Rica, se ha registrado reducción significativa de 42%, 84% y 90% en el número de hembras anidadoras por arribada en los períodos 1971–1984, 1971–1992 y 1971–2007, respectivamente (Fonseca *et al.*, 2009). Sin embargo, recientemente se ha reportado tendencias de recuperación de las poblaciones de *C. mydas* del Caribe Costarricense (Troëng & Rankin, 2005), y *L. olivacea* en el Pacífico oriental centroamericano (Ariano-Sánchez *et al.*, 2020).

En Panamá, Garcés *et al.* (2020) determinaron las características de Playa Lagarto, Pedasí, Los Santos, como sitio de anidación de tortugas *L. olivacea* y *C. mydas*, de agosto de 2016 a febrero de 2017. Sin embargo, no existen estudios que estén dando seguimiento a las tortugas que anidan en este sitio. Según los mismos autores, este refugio está bajo constante presión por el desarrollo turístico y el saqueo de nidos de tortuga.

En este contexto, la reubicación de nidos es una estrategia de conservación implementada para proteger poblaciones de tortugas marinas en áreas donde la caza, inundación de nidos, depredación natural y la erosión de las playas impactan negativamente el éxito reproductivo (García *et al.*, 2003; Troëng & Rankin, 2005). Aunque existen beneficios en la reubicación de nidadas que de otro modo tendrían pocas posibilidades de sobrevivir si se dejaran *in situ*, hay evidencia de que la reubicación puede tener efectos adversos para la condición y supervivencia de neonatos (Tanabe *et al.*, 2021).

Por tanto, y en vista de lo antes expuesto, el propósito de este trabajo fue determinar las características de la anidación de tortugas marinas, *L. olivacea* y *C. mydas*, en Playa Lagarto y evaluar el éxito de nidos reubicados en un vivero gestionado por la Fundación Tortugas Pedasí; mediante seguimiento a monitoreos nocturnos, colecta, siembra de huevos y exhumación de nidos en el refugio de vida silvestre Pablo A. Barrios.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

Playa Lagarto, se encuentra ubicada dentro del Refugio de Vida Silvestre Pablo A. Barrios, en el distrito de Pedasí, provincia de Los Santos y fue declarado área protegida mediante resolución AG0313-2009, del 4 de mayo de 2009. El refugio tiene una superficie total de 137,99 km², de los cuales 136,06 km² son de cobertura marina. La porción de tierra firme consiste en una delgada franja de costa, que es altamente vulnerable al desarrollo de las comunidades y proyectos turísticos asociadas al distrito (Pinto & Yee, 2011). Los límites del área protegida colindan al norte con el río Purio y el Golfo de Panamá (845205.27 N; 602918.71 W), al este con el Refugio de Vida Silvestre Isla Iguana (845220.72 N; 603546.06 W), al sur con Punta Mala y el Océano Pacífico (845367.06 N; 609823.77 W) y al oeste con los corregimientos de Purio, Mensabé y Pedasí (843836.08 N; 609842.48 133 W) (Garcés *et al.*, 2020).

Distribución de nidadas

Durante junio 2021 a enero 2022, se realizó monitoreo nocturno (60 horas mensuales) en Playa Lagarto, distrito de Pedasí, provincia de Los Santos. Se patrulló la playa, dos horas antes y después de la marea alta y baja. Se establecieron segmentos de playa, señalizados por nueve postes de guía, con una separación de 100 metros, para detectar si las tortugas hacen uso preferencial de espacios en la playa para hacer sus nidos (Chacón *et al.*, 2008).

Al encontrar rastros y/o tortugas anidando, se procedió a la toma del largo y ancho curvos del caparazón; si las tortugas presentaban placa, el código de la marca era registrado. A las tortugas *L. olivacea* sin marca, se les aplicó una placa de identificación para determinar posibles

eventos de reanidación. Adicionalmente, se registraron la ubicación de la puesta (zona baja, media o alta) de acuerdo con el poste de guía más cercano y el estado del nido (saqueado o depredado). De encontrarse solo el rastro, se utilizaron las huellas para identificar la especie y se tomó la medida del ancho de huella interna (HI) y externa (HE) (Bolten, 2000; Rueda-Almonacid *et al.*, 2007; Chacón *et al.*, 2008; Brenes *et al.*, 2015).

Reubicación de nidos

Los huevos de nidos silvestres fueron contabilizados y depositados cuidadosamente en bolsas plásticas para trasladarlos al vivero. En el vivero, voluntarios excavaron nidos similares al de origen, donde se depositaron los huevos corroborando la cantidad inicial. Se tomó nota de la actividad general en el manejo durante la reubicación por parte de los voluntarios. Los nidos fueron etiquetados con: la cantidad de huevos, fecha de puesta y fecha de posible eclosión de acuerdo con la especie (Vega & Robles, 2007b; Chacón *et al.*, 2008).

La temperatura del sustrato en el vivero fue medida con cinco sensores iButton, y un respaldo (USB data-logger AZ-88163), programados para capturar registros cada 5 minutos. Los sensores fueron suspendidos dentro de tubos (\emptyset 10.2 cm) de PVC y enterrados 80 cm.

Éxito de eclosión y biometría de neonatos

Al detectar neonatos en superficie, se procedió a contarlos y si sobrepasaban el 50% de los huevos sembrados en el nido, se efectuaba la exhumación de inmediato. Se registró el número de neonatos en superficie, neonatos vivos dentro del nido, neonatos muertos, cascarones, huevos sin desarrollo embrionario (HSD) y huevos con desarrollo embrionario (HCD). Para determinar el éxito de eclosión (Chacón *et al.*, 2008) se empleó la fórmula:

$$\% \text{ eclosión} = \frac{\text{total huevos eclosionados}}{\text{total huevos cuantificados}} \times 100$$

Para evaluar la biometría de los neonatos, se emplearon seis nidos por especie (> 80% de éxito de eclosión), de los cuales se seleccionaron 30 individuos al azar por cada nido. Se midió el ancho, largo del caparazón y el peso, usando un vernier (0.1 mm) y una balanza (0.01 g) digital;

posteriormente todos los neonatos fueron liberados en el borde de la playa. Esta data se empleó en el análisis de asociación entre variables biométricas de las tortugas madre y neonatos, mediante correlación de Pearson.

Granulometría y humedad de la arena

Se analizó la granulometría de la arena (González, 2013; Kenny & Sotheran, 2013) de los nidos de ambas especies junto a los postes de guía con mayor y menor actividad de anidación en la zona alta y media de la playa, incluyendo muestras del vivero. De cada muestra se separó una porción de 100 g y otra de 400 g. Estas se pesaron con una balanza digital (0.01 g) y fueron colocadas en platos de aluminio desechable para secado en horno eléctrico (Heratherm OMS100) a 75°C hasta obtener un peso seco constante por 48 horas. Las muestras de 100 g se pesaron nuevamente en seco y se calculó el porcentaje de humedad mediante la fórmula:

$$\% \text{ humedad} = \frac{\text{peso húmedo} - \text{peso seco}}{\text{peso húmedo}} \times 100$$

Una vez secas, las porciones de 400 g de arena se pasaron por la pila estándar de tamices (Hubbard Scientific), 0.50, 0.25, 0.125, 0.0625 y < 0.0625 mm. Los tamices se organizaron de manera que la arena pasara de mayor a menor luz de malla con sacudida circular por 15 minutos. Las fracciones resultantes se separaron y luego se procedió a pesarlas por separado. Finalmente, se registró el número de cada una de las muestras, el peso de la fracción y tamiz a la que pertenecía.

Geomorfología de la playa

Para identificar cambios en la playa que pudieran explicar la distribución espacial de nidos, se procedió a tomar registro fotográfico del tramo de playa que comprendió la zona de monitoreo. Para ello se empleó una cámara (12MP-HDR), y las fotografías se contrastaron con registros históricos de los años: 2015, 2016 y 2020.

Análisis de datos

Las proporciones de nidos por zona (alta, media y baja), y secciones paralelas a playa se analizaron con la prueba Chi-cuadrado de ajuste de bondad. La distribución de nidos por especie y su ubicación en función de la altura en la playa se analizó con la prueba Chi-cuadrado (asociación) de Pearson.

Las variables biométricas de los neonatos del vivero fueron comparadas entre nidos mediante la prueba ANOVA, para determinar si existía diferencia entre ellos. La igualdad de varianzas fue evaluada con la prueba de Levene ($P < 0.05$). Cuando las varianzas fueron significativamente distintas, se empleó la ANOVA de Welch; las medias fueron comparadas por pares con la prueba Tukey. La relación entre las variables biométricas de la tortuga madre y sus neonatos se evaluó con la correlación de Pearson. Del total de neonatos liberados, se comparó entre especies, la cantidad de huevos sembrados (*t*-Student), neonatos vivos, neonatos muertos, huevos sin desarrollo y huevos con desarrollo arrestado con la prueba de Mann-Whitney. Adicionalmente, para entender variabilidad en éxito de eclosión, se utilizó la regresión lineal (“stepwise”) para explorar la relación entre las variables predictoras: tiempo de eclosión (TE), cantidad de huevos sembrados (CHS) y especie, con las variables de respuesta: neonatos vivos (NV), neonatos muertos, huevos sin desarrollo (HSD) y huevos con desarrollo (HCD) (Sokal & Rohlf, 1987).

La data de humedad en los nidos del vivero, nidos salvajes de tortuga *L. olivacea* y *C. mydas* se analizó con la prueba *t* y Kruskal-Wallis según desviación de la normalidad. La prueba Chi-cuadrado, se empleó para analizar las proporciones de arena por cada tamiz correspondientes a los postes; esto se hizo para las muestras de la zona alta y media de la playa (Sokal & Rohlf, 1987). La misma prueba se usó para analizar el conjunto de las proporciones correspondientes al vivero y nidos silvestres de ambas especies, así como también para proporciones de arena en los tamices de los nidos por especie (González, 2013). Para el análisis de la data obtenida en las giras mensuales, los datos fueron organizados en Excel y posteriormente analizados en MiniTab 19; reportados con $\alpha = 0.05$ y valores-P exactos cuando fue posible calcularlos.

RESULTADOS

Distribución de nidadas y biometría de tortugas

Se encontró diferencia significativa en las proporciones de nidos distribuidos por zona de playa (alta = 62, media = 25 y baja = 3; $\chi^2 = 59.27$, $df = 2$, $P < 0.001$). No se detectó diferencia en la distribución de nidos por especie y su ubicación en función de la altura de la playa ($\chi^2 = 1.70$, $df = 2$, $P = 0.429$). La frecuencia de nidos detectados también

mostró diferencia entre secciones de playa ($\chi^2 = 57.79$, $df = 9$, $P < 0.001$; Figura 1A).

Se lograron medir 90 tortugas en la playa, 52 *Lepidochelys olivacea* y 38 *Chelonia mydas*. El largo del caparazón de *L. olivacea* registró 67.90 ± 3.37 cm (61–76 cm) y el ancho 70.25 ± 4.46 cm (60–83 cm). En cuanto a *C. mydas* el largo del caparazón registró 90.18 ± 7.80 cm (70–109 cm) y el ancho 86.26 ± 6.53 cm (79–104 cm). El caparazón de las tortugas *L. olivacea* fue más ancho que largo ($t = -3.01$, $P = 0.003$), mientras que los caparazones de *C. mydas* fueron más largos que anchos ($t = 2.37$, $P = 0.020$). El análisis de regresión del ancho y largo del caparazón de ambas especies confirmó relación significativa entre las variables, pero el ajuste fue pobre en *L. olivacea* ($r^2 = 14.05\%$, $P = 0.007$), mientras que en *C. mydas* el ajuste fue mejor ($r^2 = 53.75\%$, $P < 0.001$).

Las tortugas *L. olivacea* más grandes llegaron a anidar en el mes de septiembre (largo 69 ± 3.54 cm; 65–76 cm y ancho 72.54 ± 5.04 cm; 65–83 cm). Las tortugas *C. mydas* con mayor talla se registraron en enero (largo 92.74 ± 8.46 cm; 80–109 cm y ancho 87.95 ± 6.42 cm; 82–104 cm). Sin embargo, al comparar las medias de tallas por mes de la tortuga *L. olivacea*, no se detectó diferencia significativa (largo: ANOVA, $F_{(7,43)} = 0.68$, $P = 0.689$; ancho: ANOVA, $F_{(7,43)} = 1.98$, $P = 0.081$). Para tortugas *C. mydas* tampoco se detectó diferencia en talla por mes (largo: ANOVA, $F_{(6,31)} = 0.90$, $P = 0.508$; ancho: ANOVA, $F_{(6,31)} = 1.19$, $P = 0.338$).

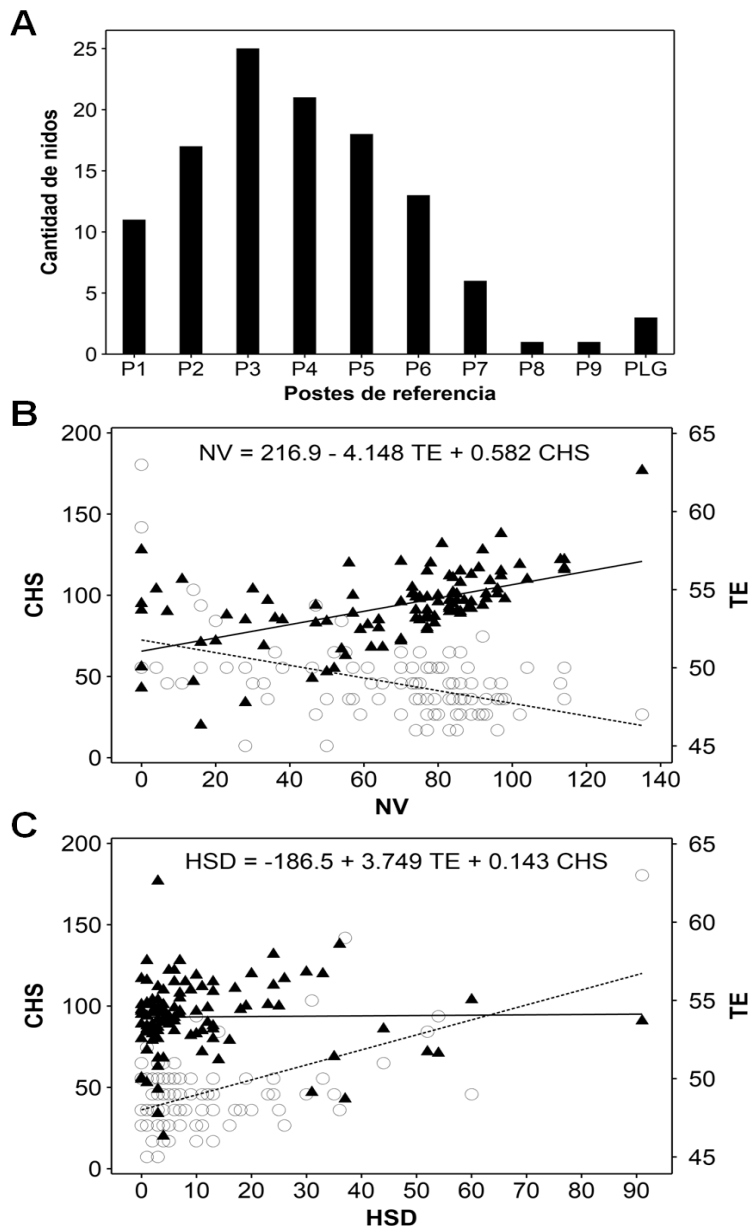


Fig. 1 Distribución de nidos y predictores del éxito de eclosión versus indicadores de desempeño en tortugas *Lepidochelys olivacea* y *Chelonia mydas* de Playa Lagarto, Los Santos, Panamá. A:

Barras indican cantidad de nidos por poste de referencia; PLG: Playa La Garita. Indicadores de desempeño, B: neonatos vivos (NV), y C: (HSD) huevos sin desarrollo. Predictores: TE (tiempo hasta eclosión); círculos y línea de regresión punteada. CHS (cantidad de huevos sembrados); triángulos negros y línea de regresión sólida.

A lo largo del periodo de estudio se lograron marcar 42 tortugas *L. olivacea*, de las cuales cinco reanidaron, mientras que cuatro tortugas *C. mydas*, previamente marcadas, reingresaron a la playa para anidar en distintas fechas. Estas hembras promediaron 76.33 ± 9.63 cm y 75.33 ± 7.09 cm de largo y ancho del caparazón, respectivamente. Dos de estas hembras (una de cada especie), retornaron para intentar anidar al menos dos veces (Cuadro 1). No hubo diferencia entre la primera (89.67 ± 19.88 huevos) y segunda (75.33 ± 26.99) nidada de este grupo de tortugas ($t = 2.24$, $P = 0.076$).

Cuadro 1. Recuento de los reingresos y número de huevos depositados por tortugas marcadas de las especies *Lepidochelys olivacea* y *Chelonia mydas* en Playa Lagarto, Los Santos, Panamá. Las abreviaturas N y E, representan la cantidad de huevos depositados en la primera hasta la tercera nidada y el éxito de dichos nidos, respectivamente. Asteriscos indican tortugas que ingresaron a la playa, pero no completaron el proceso de puesta; los guiones representan tortugas que no retornaron por tercera vez durante el periodo de estudio.

	Placa	Fecha de ingreso	Hora	Días entre reingresos	Huevos/nido					
					N1	E1	N2	E2	N3	E3
<i>Lepidochelys olivacea</i>	PY204	6/30/21	10:10 PM							
		7/14/21	9:57 PM	14		*	87	93%	55	95%
		7/29/21	4:27 AM	15						
	PY205	7/1/21	9:35 PM							
		7/8/21	10:13 PM	7	98	100%	79	97%		-
	PY210	8/17/21	10:05 PM							
9/2/21		11:40 PM	15	117	97%	121	58%		-	
PY229	9/30/21	1:15 AM								
	10/14/21	10:12 PM	14		*	86	86%		-	
PY237	11/14/21	2:46 AM								
	11/30/21	9:40 PM	16	101	95%	85	45%		-	
<i>Chelonia mydas</i>	PY202	6/21/21	9:52 PM							
		6/22/21	10:40 PM	1		*	47	30%		-
		7/3/21	10:30 PM							
	PY206	7/4/21	10:26 PM							
		7/30/21	9:30 PM	1		*	72	22%	44	0%
				26						
PY216	8/20/21	11:10 PM								
	11/14/21	9:36 PM	84	117	78%		*		-	
PY221	9/1/21	11:38 PM								
	9/13/21	10:34 PM	12	63	87%	68	91%		-	

Reubicación de nidos y éxito de eclosión

En general durante la reubicación de nidos no se observó un estándar implementado en el proceso por parte de los voluntarios y tampoco recibieron refuerzo de asesoría técnica. Se lograron reubicar 116 nidos de tortuga, de los cuales 91 fueron de *L. olivácea* con un total de 8,631 huevos y 1,081 de *C. mydas*, de los cuales 7,059 neonatos lograron eclosionar. Se cuantificaron 6,517 neonatos de *L. olivacea*, mientras que otros 542 fueron de *C. mydas*. La cantidad de huevos sembrados por los voluntarios en cada nido varió, promediando 93.38 ± 22.33 huevos con 67.88 ± 29.79 neonatos vivos por nido como resultado. La exhumación de los nidos reflejó que la mortalidad de neonatos fue de 283 (2.91%). En conjunto, el éxito de eclosión fue del 72.68%, mientras que los huevos de *L. olivacea* y *C. mydas* alcanzaron 75.51% y 50.14% de éxito de eclosión, respectivamente.

Durante la temporada de monitoreo, se detectaron 16 nidos saqueados, 14 de *L. olivacea* y 2 de *C. mydas*. En el vivero se dio el saqueo de cuatro nidos con pérdida de 184 huevos de *L. olivacea* y 199 huevos de *C. mydas*; dos nidos de cada especie. Considerando los porcentajes de eclosión por especie, se estima que este total de huevos perdidos hubiesen producido 239 neonatos.

Cuadro 2. Estadística descriptiva del éxito de eclosión de la tortuga lora (*Lepidochelys olivacea*) y verde (*Chelonia mydas*) durante la temporada junio 2021 a enero 2022 en Playa Lagarto, Los Santos, Panamá.

	Variables por nido	Total	Media \pm SD	Min.	Máx.
<i>L. olivacea</i>	Huevos sembrados	8,631	95.90 ± 21.17	20	177
	Neonatos vivos	6,517	72.41 ± 27.18	2	135
	Neonatos muertos	265	2.94 ± 4.93	1	23
	Huevos sin desarrollo	861	9.57 ± 13.72	1	91
	Huevos con desarrollo	494	5.49 ± 12.40	1	68
	Nidos con 100% de mortalidad		3; $n = 275$ huevos		
<i>C. mydas</i>	Huevos sembrados	1,081	77.21 ± 23.56	43	117
	Neonatos vivos	542	38.71 ± 30.23	4	91
	Neonatos muertos	18	1.28 ± 3.36	1	12
	Huevos sin desarrollo	248	17.71 ± 18.89	2	54
	Huevos con desarrollo	34	2.43 ± 4.29	1	14
	Nidos con 100% de mortalidad		2; $n = 138$ huevos		

La estadística descriptiva del éxito de eclosión para ambas especies está contenida en el cuadro 2. Los neonatos muertos por nido registraron un promedio de 2.72 ± 4.77 , los huevos sin desarrollo, 10.66 ± 14.68 y los huevos con desarrollo arrestado, 5.08 ± 11.68 . En cuanto a las demás variables, la comparación entre las tortugas solo reflejó diferencias significativas en la cantidad de neonatos vivos (Cuadro 3).

Cuadro 3. Comparación de los indicadores de éxito de eclosión, durante la temporada junio 2021 a enero 2022, entre la tortuga lora (*L. olivacea*) y verde (*C. mydas*) en Playa Lagarto, Los Santos, Panamá. HSD: huevos sin desarrollo, HCD: huevos con desarrollo arrestado.

Indicadores de éxito de eclosión	Valor-W	Mann-Whitney Valor-p
Neonatos vivos	362.50	< 0.001
Neonatos muertos	552.00	0.059
HSD	902.50	0.111
HCD	648.50	0.393

La temperatura promedio en el vivero fue 32.6°C ($30.1\text{--}34^{\circ}\text{C}$). No obstante, el mejor ajuste de los predictores se dio con los indicadores: neonatos vivos (NV) ($r^2 = 40.68\%$, $P < 0.001$; Figura 1B) y huevos sin desarrollo (HSD) ($r^2 = 36.24\%$, $P < 0.001$; Figura 1C).

Biometría de neonatos

Los neonatos ($N = 359$) promediaron 34.26 ± 3.38 mm ($33.34\text{--}47.70$ mm) para el ancho de caparazón, mientras que para el largo se obtuvo 41.98 ± 3.33 mm ($3.54\text{--}55.87$ mm). Las medias de ancho de caparazón en los nidos variaron de $30.86\text{--}37.96$ mm, y esta diferencia entre nidos fue significativa (Levene = 13.06, $P < 0.001$; ANOVA de Welch, $F_{(11,135)} = 64.49$, $P < 0.001$). Al comparar las medias por pares (Tukey), se encontró diferencia significativa entre el 90% de los nidos. El largo de caparazón de los neonatos entre nidos varió de $37.67\text{--}46.83$ mm; esta diferencia fue significativa (Levene = 12.22, $P < 0.001$; ANOVA de Welch, $F_{(11,135)} = 47.36$, $P < 0.001$). La comparación por pares (Tukey) reveló que solo el 10% de los nidos en el vivero presentaron diferencia entre sí.

El peso de los neonatos promedió 15.39 ± 2.08 g, ($11\text{--}20$ g), mientras que el peso promedio por nido fue $12.60\text{--}19.17$ g; se detectó diferencia entre nidos, (Levene = 1.28, $P = 0.149$; ANOVA de una vía, $F_{(11,347)} =$

258.17, $P < 0.001$). Al comparar las medias por pares (Tukey), el 97% de los nidos presentaron diferencias significativas. El análisis de asociación entre variables biométricas de las tortugas madre y neonatos indicó correlación entre el largo del caparazón de la tortuga adulta (LCTA) y el largo promedio de los neonatos (LPCN), solamente (Pearson, $r = 0.46$).

Granulometría y humedad de la arena

Granulometría en la playa

El 50% de las muestras de arena asociadas a los postes de referencia de la playa presentaron mayor retención en el tamiz de 0,50 mm, el resto de las muestras se retuvo mayormente en el tamiz de 0,25 mm. No se detectó diferencia significativa en la proporción observada de arena retenida en los tamices de 0.25 mm y <0.0625 mm procedentes de la zona superior. Por otro lado, en las muestras correspondientes a la zona media, solo hubo diferencia significativa en el tamiz de 0.50 mm en comparación con la proporción esperada (Cuadro 4).

Cuadro 4. Proporciones de arena retenida por tamices en muestras proveniente de los postes de referencia en la zona superior y media de Playa Lagarto durante la temporada junio 2021 a enero 2022, Pedasí, Los Santos.

Tamiz (mm)	Zona superior de playa			Zona media de playa		
	N (g)	χ^2	Valor-p	N (g)	χ^2	Valor-p
0.50	138.90	6.65	0.036	113.20	12.90	0.002
0.25	113.80	0.88	0.643	145.24	4.46	0.107
0.125	33.57	7.24	0.027	34.73	4.32	0.115
0.0625	13.54	9.85	0.007	3.74	1.88	0.391
<0.0625	0.12	0.09	0.956	0.05	0.03	0.985

Granulometría en el vivero y nidos silvestres

El 53.73% de la muestra de arena del vivero consistió en granos de 0,50 mm, mientras que el 80% de las muestras de los nidos silvestres de *L. olivacea*, tuvo mayor retención en el tamiz de 0,25 mm. El 90% de la arena en muestras procedentes de nidos de *C. mydas* resultó retenida a

0,50 mm (Figura 2). Esta distribución de proporciones entre muestras fue significativa para los tamices 0.50–0.125 mm. en las muestras de nidos silvestres de *L. olivacea*; sin embargo, para *C. mydas* no hubo diferencia entre las proporciones retenidas (Cuadro 5).

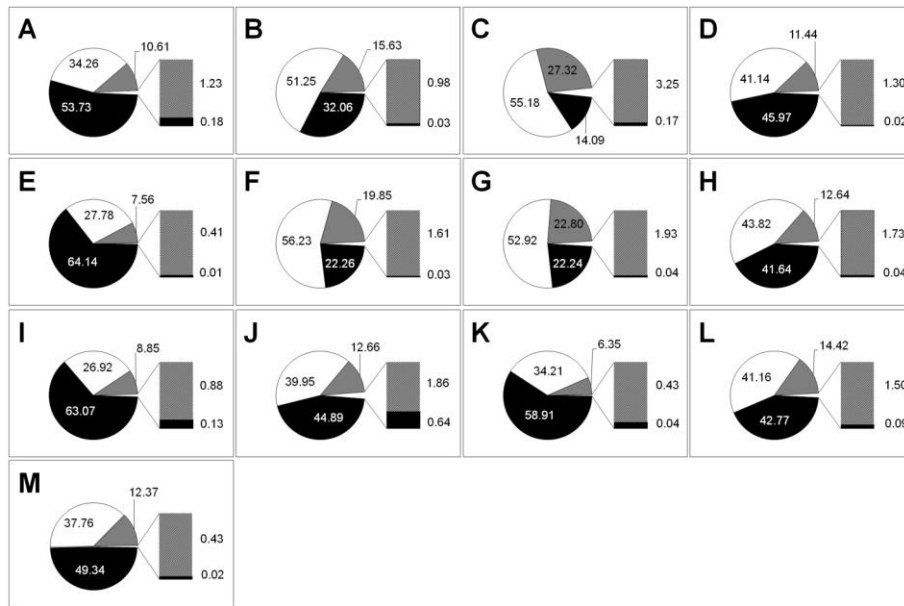


Fig. 2 Granulometría de la arena asociada a nidos del vivero y nidadas silvestres de *Lepidochelys olivacea* y *Chelonia mydas* en Playa Lagarto, junio 2021 a enero 2022, Los Santos. A: Vivero; B–G: Muestras *L. olivacea*; H–M: Muestras *C. mydas*. Color de las fracciones y tamaño del tamiz: negro: 0.50 mm; blanco: 0.25 mm; gris: 0.125 mm; entramado en barra: 0,0625 mm; barra en negro: <0.0625 mm-

Cuadro 5. Comparación entre proporciones de arena retenida en tamices con muestras de nidos silvestres de *L. olivacea* y *C. mydas*, durante la temporada junio 2021 a enero 2022, Playa Lagarto, Los Santos, Panamá.

Tamiz (mm)	<i>Lepidochelys olivacea</i>			<i>Chelonia mydas</i>		
	N (g)	χ^2	Valor-p	N (g)	χ^2	Valor-p
0.50	200.76	51.59	0.000	300.62	7.96	0.158
0.25	284.50	12.82	0.025	223.81	4.88	0.431
0.125	104.60	15.42	0.009	67.29	4.02	0.547
0.0625	9.48	3.00	0.701	6.83	1.82	0.873
<0.0625	0.30	0.34	0.997	0.97	1.73	0.885

Humedad de la arena

Posterior al secado de muestras, se detectó diferencia significativa en el contenido de agua (antes-después) de la arena procedente de distintas secciones de playa ($t = 3.35$, $P = 0.020$), vivero y nidos silvestres (vivero y nidos silvestres, $t = 7.17$, $P < 0.001$); sin embargo, no hubo diferencia entre muestras de secciones de playa o en nidos (postes, $H = 5$, $P = 0.416$; nidos, $H = 12$, $P = 0.446$).

Geomorfología de la playa

Durante el presente estudio, el oleaje provocó la formación de bermas a lo largo de la playa. El registro fotográfico histórico (2015, 2016 y 2020) indica que el proceso ha transcurrido en años anteriores con variación en ubicación y severidad de desniveles (Figura 3). Las bermas se distribuyeron, como resultantes del proceso de erosión, de forma diferencial y con menor frecuencia frente a los postes de referencia tres y cuatro.



Fig. 3 Registro histórico de formación de bermas en Playa Lagarto, Los Santos, Panamá. A: poste 2 (27/8/2015); B: poste 6 (7/5/2016); C: poste 5 (7/6/2020); D: poste 3 (7/6/2020); E: poste 5 (17/2/2022); F: poste 1 (18/02/2022). Bermas con 1.5–3.2 metros de desnivel. Punteros en blanco indican bermas y rocas expuestas posteriores a la formación de las bermas.

DISCUSIÓN

En las especies sin cuidado parental, la selección del sitio para anidar es importante, ya que las características de dichos sitios afectan el desarrollo y sobrevivencia de embriones (Kamel & Mrosovsky, 2004; Quiñones *et al.*, 2007; Booth *et al.*, 2020). Según Garcés *et al.* (2020) y Garcés & Royo (2017), las tortugas *L. olivacea* optan por anidar en zonas media de la playa, mientras que *C. mydas* lo hace en la zona alta. Este patrón no se manifestó en este estudio ya que los nidos se ubicaron mayormente en zona alta y tampoco hubo diferencia en la distribución de nidos por especie. Las tortugas tienden a evitar arenas gruesas y finas, dado que bajas tasas de anidación han sido asociadas con dicho tipo de arena (Bolongaro *et al.*, 2010). Al excavar en arena gruesa, las tortugas con frecuencia abandonan la construcción del nido, debido a que esta es poco cohesiva y las paredes de este colapsan. En contraste las arenas finas no promueven intercambio gaseoso apropiado y dificultan el proceso de emergencia de neonatos (Mortimer, 1990; Booth *et al.*,

2020). La distribución de nidos observada en este estudio pudo deberse, en parte, a que la arena en la zona alta de la playa consistió en una mezcla heterogénea de granos medianos, mientras que la arena de la zona media estuvo mezclada de forma más homogénea con granos finos, ya que en la zona media no hubo diferencia entre las proporciones retenidas de granos de 0.25 a <0.0625 mm.

En este estudio, la biometría del caparazón de las tortugas *L. olivacea* fue similar (largo y ancho) a lo encontrado en Isla Cañas (Vega & Robles, 2005) y Playa Lagarto (largo) (Garcés *et al.*, 2020) durante los años 2002 y 2016–2017; pero el ancho de caparazón difiere del reporte previo en Playa Lagarto. El largo y ancho promedio del caparazón de *C. mydas* guardó similitud con el reportado para Playa Cambutal en el 2011 (González, 2014) y Playa Lagarto del 2016–2017. Esta similitud en tallas implica el aparente ingreso a Playa Lagarto de cohortes distintas, con cierto grado de reclutamiento, pero en años diferentes. Este sería el caso, dado que la talla mínima, para hembras *L. olivacea* maduras, de la temporada 2021–2022, fue de 60–61 cm (largo-ancho). Cinco años antes (2016–2017), este segmento estuvo representado por hembras de 50–55 cm (largo-ancho) en Playa Lagarto (Garcés *et al.*, 2020). Esta temporalidad de ingreso por cohortes quizá sea un patrón cíclico para *L. olivacea*, considerando que la talla mínima en nuestro estudio fue igual a la reportada por Vega & Robles (2005). Este patrón se repitió en *C. mydas*, pero en orden inverso, donde la talla mínima (largo-ancho) fue inferior (70–79 cm en 2021–2022) al reporte de Garcés *et al.* (2020) en Playa Lagarto (82–89 cm). En el presente estudio, no hubo diferencia en las tallas entre meses para ambas especies, lo que indica consistencia en los límites de talla que posiblemente caracterizan dichas cohortes por año.

En este estudio, se logró identificar hembras que ingresaron a la playa en dos y hasta tres ocasiones distintas, para anidar. Brenes *et al.* (2015) reportó un promedio de dos retornos por temporada para *L. olivacea*, coincidiendo con el reporte de Chacón *et al.* (2008). Aunque la reanidación es común en todas las tortugas hembra (López-Castro *et al.*, 2004; Crean & Marshall, 2009; Lovich *et al.*, 2015), este constituye el primer reporte de esta conducta para *L. olivacea* y *C. mydas* en Playa Lagarto, y hasta donde se conoce, del Pacífico panameño. Reanidar les permite a las tortugas parcelar el esfuerzo reproductivo, disminuyendo el impacto de factores de riesgo para las nidadas como: erosión,

inundaciones y/o depredación. De manera que, al poner varios nidos las hembras mitigan la imprevisibilidad de los ambientes, dando mejores probabilidades de sobrevivencia a nidos y neonatos durante etapas críticas (Crean & Marshall, 2009; Ekanayake *et al.*, 2016); lo que posiblemente explicaría el patrón de reingresos observado en este estudio.

Las mediciones de temperatura del sustrato en este trabajo coinciden con los registros de Isla Cañas (Vega & Robles, 2007a). En el presente estudio las oscilaciones térmicas probablemente se debieron a las lluvias durante el mes de diciembre e inicio de la época seca. La data fue limitada, pero el registro osciló entre 30–34°C, promediando 32.6°C; temperatura dentro del rango óptimo para una proporción de sexo equilibrada (Valadez *et al.*, 2000).

El número total de nidos reubicados y por especie superó la cantidad reportada por Garcés & Royo (2017) en Mata Oscura y por Garcés *et al.* (2020) en Playa Lagarto. No obstante, el éxito de eclosión observado en el presente trabajo fue inferior al estudio previo en Playa Lagarto, incluso el vivero en Mata Oscura registró un porcentaje mayor al de este estudio. Los predictores del éxito de eclosión disponibles: tiempo hasta eclosión (TE), cantidad de huevos sembrados (CHS) y especie no explican, en su totalidad, la variabilidad observada en el análisis de regresión. A pesar de contar con más nidos y huevos por nido, el éxito de eclosión en el vivero de Playa Lagarto fue bajo. El saqueo de huevos y la mortalidad de neonatos (2.91%) por si solos tampoco explican el bajo éxito de eclosión; sin embargo, la variabilidad del manejo en reubicación por voluntarios (profundidad de nidos, tiempo hasta la siembra y manipulación de huevos) posiblemente introduce un factor de incertidumbre que debe explorarse en futuros estudios, en especial para tortugas verdes, con solo 50% de éxito de eclosión.

El largo, ancho del caparazón y el peso de neonatos fueron similares a los reportados para Isla Cañas por Vega & Robles, (2007b). El análisis biométrico arrojó variabilidad entre nidos, coincidiendo con el reporte de Isla Cañas, exceptuando, el ancho del caparazón, en el cual Vega & Robles (2007a) no encontraron diferencia. Esta variabilidad esta explicada por efectos maternos entre la talla de la tortuga adulta y el tamaño de los neonatos (Parker & Begon, 1986; Hays *et al.*, 1993;

López-Castro *et al.*, 2004; Quiñones *et al.*, 2007). Este es el caso en nuestro estudio debido a la correlación (positiva) que se detectó entre el largo del caparazón de las tortugas adultas y el largo del caparazón promedio de los neonatos.

El proceso de erosión costera causa formación de barreras paralelas a la playa con desniveles abruptos, llamadas bermas (Payo *et al.*, 2008; Rivera-Solís, 2021). Dichos desniveles pueden impactar negativamente la actividad de las tortugas marinas, debido a que obstaculizan el acceso a sitios de anidación (Sunamura, 1989; Bolongaro *et al.*, 2010). Posiblemente la formación de bermas frente a la playa también influyó la distribución de nidos, ya que durante los monitoreos se pudo encontrar rastros de tortuga frente a bermas, pero eventualmente dichos rastros indicaban retorno al mar sin deposición de huevos. Este escenario es similar al reportado por Witherington *et al.* (2011) y Fujisaki & Lamont (2016), donde las barreras para el ingreso a sitios de anidación modificaron la conducta de las tortugas. En este estudio, la sección de playa asociada al tercer y cuarto poste de guía acumuló la mayor cantidad de nidos, posiblemente porque en esta zona las bermas fueron infrecuentes. Así, las tortugas que llegaban a esta parte de la playa lograban completar el proceso de anidación con mayor frecuencia, lo que explicaría en parte el patrón de distribución observado.

CONCLUSIONES

La distribución de nidos depende de las características de la arena y erosión en la playa. La mayoría de las tortugas anidó en la zona alta de la playa y secciones asociadas con accesos libres de bermas. La biometría comparada de los años 2017 y 2021 sugiere el ingreso de cohortes específicas por temporada de anidación. Este es el caso ya que no hubo diferencia en la talla de las tortugas entre meses. Se detectó efectos maternos en la biometría de los neonatos, posiblemente asociada al tamaño de la tortuga madre. Este estudio presenta el primer reporte de reanidación confirmada de *L. olivacea* y *C. mydas* en Playa Lagarto. Las tortugas expresan esta conducta posiblemente en función al riesgo de depredación y características de la playa para optimizar el esfuerzo reproductivo. Existe la necesidad de desarrollar métodos que aseguren que la incubación de huevos de tortuga en viveros sea una herramienta de conservación más efectiva. Esta necesidad es evidente

ya que el vivero no fue efectivo en proteger las nidadas del saqueo en el área de estudio. La elección del sitio del vivero puede mejorar el éxito de nidos artificiales al estudiar la granulometría y composición de la arena. El éxito de eclosión en este estudio, respecto a otros viveros fue bajo, a pesar de que se contó con más nidos y huevos por nido. El manejo en la reubicación de nidos debe revisarse, ya que se ha demostrado que la manipulación de huevos y profundidad inapropiados puede tener efectos adversos en el desarrollo de embriones y por ende en el éxito de eclosión.

AGRADECIMIENTO

Este proyecto fue apoyado parcialmente por la Fundación Tortugas Pedaquí, Azuero Sostenible, el Programa de Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD) SGP, Programa de Pequeñas Donaciones del FMAM (PPD) y CREHO (Centro Regional para el hemisferio occidental) RAMSAR. Nuestro agradecimiento se extiende a los revisores que contribuyeron comentarios para la mejora de versiones previas del manuscrito.

REFERENCIAS

Ariano-Sánchez, D., Muccio, C., Rosell, F. & Reinhardt, S. (2020). Are trends in Olive Ridley sea turtle (*Lepidochelys olivacea*) nesting abundance affected by El Niño Southern Oscillation (ENSO) variability? Sixteen years of monitoring on the Pacific coast of northern Central America. *Glob. Ecol. Conserv.* 24(2020): p. e01339. DOI:10.1016/j.gecco.2020.e01339.

Baillie, J. & Groombridge, B. (1996). 1996 IUCN red list of threatened animals. *Biol. Conserv.* Gland, Switzerland: International Union for Conservation of Nature and Natural Resources.

Bolongaro, A., Márquez, A. Z., Torres, V. & García, A. (2010). Vulnerabilidad de sitios de anidación de tortugas marinas por efectos de erosión costera en el estado de Campeche. in Botello. A. V, Villanueva. S., Gutiérrez. J., & Rojas. J.L. (eds) Vulnerabilidad de las zonas costeras mexicanas ante el cambio climático. 1st edn. Campeche, Mexico: Universidad Autónoma de Campeche pp. 73–96.

Bolten, A. B. (2000). Técnicas para la medición de tortugas marinas. in Eckert, K.L., Bjorndal, K.A., Abreu-grobois, F.A., & Donnelly, M. (eds) Técnicas de investigación y manejo para la conservación de tortugas marinas. 1st edn. Pennsylvania, USA: IUCN Marine Turtle Specialist Group pp. 126–131.

Booth, D. T., Archibald-Binge, A. & Limpus, C. J. (2020). The effect of respiratory gases and incubation temperature on early stage embryonic development in sea turtles. *PLoS One* 15(12): pp. 1–12. DOI:10.1371/journal.pone.0233580.

Brenes, O., Bonilla, L., Bonilla, A. & Vega, A. (2015). Características de la anidación de, *Lepidochelys olivacea* (Testudinata: Cheloniidae) entre el 2010 y 2012 en Playa Tortuga Ojochal de Osa, Puntarenas, Costa Rica. *Rev. Biol. Trop.* 63(1): pp. 339–349.

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. 1st edn. San José, Costa Rica: Secretaria Pro Tempore de la Convención Interamericana para la Protección y Conservación de las Tortugas Marinas (CIT).

Chassin-Noria, O., Abreu-Grobois, A., Dutton, P. H. & Oyama, K. (2004). Conservation genetics of the east Pacific Green Turtle (*Chelonia mydas*) in Michoacan, Mexico. *Genetica* 121(2): pp. 195–206. DOI:10.1023/B:GENE.0000040394.47843.e4.

Crean, A. J. & Marshall, D. J. (2009). Coping with environmental uncertainty: Dynamic bet hedging as a maternal effect. *Philos. Trans. R. Soc. B Biol. Sci.* 364(1520): pp. 1087–1096. DOI:10.1098/RSTB.2008.0237.

Ekanayake, E. M. L., Kapurusinghe, T., Saman, M. M., Rathnakumara, D. S., Samaraweera, P. & Rajakaruna, R. S. (2016). Reproductive output and morphometrics of Green Turtle, *Chelonia mydas* nesting at the Kosgoda rookery in Sri Lanka. *Ceylon J. Sci.* 45(3): p. 103. DOI:10.4038/CJS.V45I3.7406.

Fonseca, L. G., Murello, G. A., Guadamúz, L., Spínola, R. M. & Valverde, R. A. (2009). Downward but stable trend in the abundance of

arribada Olive Ridley sea turtles (*Lepidochelys olivacea*) at Nancite Beach, Costa Rica (1971-2007). *Chelonian Conserv. Biol.* 8(1): pp. 19–27. DOI:10.2744/CCB-0739.1.

Frazer, N. B. (1992). Sea Turtle Conservation and Halfway Technology. *Conserv. Biol.* 6(2): pp. 179–184. DOI:10.1046/J.1523-1739.1992.620179.X.

Fujisaki, I. & Lamont, M. M. (2016). The effects of large beach debris on nesting sea turtles. *J. Exp. Mar. Bio. Ecol.* 482: pp. 33–37. DOI:10.1016/j.jembe.2016.04.005.

Garcés, H., Batista, A. B. & Sánchez, N. (2020). Caracterización de sitios de anidación de tortugas marinas en Playa Lagarto, Pedasí, Provincia de Los Santos, Panamá. *Tecnociencia* 22(2): pp. 259–277. DOI:10.48204/j.tecno.v22n2a14.

Garcés, H. & Royo, P. (2017). Éxito de Incubación en vivero de Tortuga Lora en Playa Mata Oscura, Provincia de Veraguas, Panamá. *Rev. Científica la Univ. Marítima Int. Panamá* 3(1): pp. 18–22.

García, A., Ceballos, G. & Adaya, R. (2003). Intensive beach management as an improved sea turtle conservation strategy in Mexico. *Biol. Conserv.* 111(2): pp. 253–261. DOI:10.1016/S0006-3207(02)00300-2.

Georges, A., Limpus, C. J. & Parmenter, C. J. (1993). Natural history of the Chelonia. In: Fauna of Australia - Amphibia and Reptilia. in Glasby, C.J., Ross, G.J.B., & Beesley, P.L. (eds) Fauna of Australia, Amphibia & Reptilia, Canberra, Australia: Australian Government Publishing Service pp. 1–18.

González, A. (2013). Caracterización física y biológica de la playa de anidación de tortugas marinas de Mata Oscura, Veraguas, Panamá. Universidad Marítima Internacional de Panamá.

González, L. (2014). Descripción y biometría de las especies de tortugas marinas en playas de anidación de Cambutal, Los Santos Panamá. Universidad Marítima Internacional de Panamá.

Hays, G. C., Adams, C. R. & Speakman, J. R. (1993). Reproductive investment by Green Turtles nesting on Ascension Island. *Can. J. Zool.* 71(6): pp. 1098–1103. DOI:10.1139/z93-149.

Heithaus, M. R., Wirsing, A. J., Thomson, J. A. & Burkholder, D. A. (2008). A review of lethal and non-lethal effects of predators on adult marine turtles. *J. Exp. Mar. Bio. Ecol.* 356(1–2): pp. 43–51. DOI:10.1016/J.JEMBE.2007.12.013.

Kamel, S. J. & Mrosovsky, N. (2004). Nest site selection in Leatherbacks, *Dermochelys coriacea*: Individual patterns and their consequences. *Anim. Behav.* 68(2): pp. 357–366. DOI:10.1016/J.ANBEHAV.2003.07.021.

Kenny, A. J. & Sotheran, I. (2013). Characterising the physical properties of seabed habitats. in Eleftheriou, A. (ed.) *Methods for the Study of Marine Benthos: Fourth Edition*. 4th edn. Crete, Greece: Blackwell Scientific Publications [for the] International Biological Programme, London pp. 47–96. DOI:10.1002/9781118542392.

López-Castro, M. C., Carmona, R. & Nichols, W. J. (2004). Nesting characteristics of the Olive Ridley turtle (*Lepidochelys olivacea*) in Cabo Pulmo, southern Baja California. *Mar. Biol.* 145(4): pp. 811–820. DOI:10.1007/S00227-004-1359-X.

Lovich, J. E., Ennen, J. R., Yackulic, C. B., Meyer-Wilkins, K., Agha, M., Loughran, C., Bjurlin, C., Austin, M. & Madrak, S. (2015). Not putting all their eggs in one basket: bet-hedging despite extraordinary annual reproductive output of desert tortoises. *Biol. J. Linn. Soc.* 115(2): pp. 399–410. DOI:10.1111/BIJ.12505.

Marcovaldi, M. A. & Thomé, J. C. A. (2000). Reducción de las Amenazas a las Tortugas. in Eckert, K.L., Bjorndal, K.A., Abreu-grobois, F.A., & Donnelly, M. (eds) *Técnicas de Investigación y Manejo para la Conservación de las Tortugas Marinas*. 1st edn. Pennsylvania, USA: IUCN Marine Turtle Specialist Group pp. 187–191.

Meylan, A. B. & Meylan, P. A. (2000). Técnicas de Investigación y Manejo para la Conservación de las Tortugas Marinas. in Eckert, K.L., Bjorndal, K.A., Abreu-grobois, F.A., & Donnelly, M. (eds) *Técnicas de Investigación y Manejo para la Conservación de las Tortugas Marinas*.

1st edn. Pennsylvania, USA: IUCN Marine Turtle Specialist Group pp. 3–5.

Mortimer, J. A. (1990). The influence of beach sand characteristics on the nesting behavior and clutch survival of Green Turtles (*Chelonia mydas*). *Copeia* 1990(3): pp. 802–817. DOI:10.2307/1446446.

Parker, G. A. & Begon, M. (1986). Optimal egg size and clutch size: effects of environment and maternal phenotype. *Am. Nat.* 128(4): pp. 573–592. DOI:10.1086/284589.

Payo, A., Kobayashi, N., Muñoz-Pérez, J. & Yamada, F. 2008. Predictibilidad de la formación de escarpe en playas de arena en un tanque multidireccional de oleaje. *Ciencias Mar.* 34(1): pp. 45–54. DOI:10.7773/cm.v34i1.1265.

Pinto, I. & Yee, J. (2011). Diagnóstico de las Áreas Marinas Protegidas y de las Áreas Marinas para la Pesca Responsable en el Pacífico Panameño. 1st edn. Fundación MarViva. Panamá.

Quiñones, L., Patiño-Martínez, J. & Marco, A. (2007). Factores que influyen en la puesta, la incubación y el éxito de eclosión de la Tortuga Laúd, *Dermochelys coriacea*, en La Playona, Chocó, Colombia. *Rev. española Herpetol.* (21): pp. 5–17.

Reavis, J. L., Rojas-cañizales, D., Mejías-balsalobre, C., Naranjo, I., Arauz, R. & Senko, J. F. (2022). Dynamics of human take and animal predation on sea turtle nests in Northwest Costa Rica. *PeerJ* (10:e12925): pp. 1–16. DOI:10.7717/peerj.12925.

Rivera-Solís, J. A. (2021). Depósitos eólicos del trópico húmedo: caso de la franja marino-costera del este de la Península de Azuero, Panamá. *Rev. Geográfica América Cent.* 1(66): pp. 99–125. DOI:10.15359/rgac.66-1.4.

Rueda-Almonacid, J. V. *et al.* (2007). Las tortugas y los crocodilianos de los países andinos del trópico. 1st edn. Russell A. Mittermeier & A. Rylands. Bogotá, Colombia: Conservación Internacional.

Sifuentes-Romero, I., Tezak, B. M., Milton, S. L. & Wyneken, J. (2018). Hydric environmental effects on turtle development and sex ratio. *Zoology* 126: pp. 89–97. DOI:<https://doi.org/10.1016/j.zool.2017.11.009>.

Sokal, R. R. & Rohlf, F. J. (1987). *Biostatistics*. 2nd edn. USA, New York: Francise & Co.

Sosa-Cornejo, I. *et al.* (2021). Nesting trends of Olive Ridley sea turtles, *Lepidochelys olivacea* (Testudinata: Cheloniidae) on two beaches in Northwestern Mexico after 30 and 40 years of conservation. *Rev. Biol. Trop.* 69(3): pp. 1124–1137. DOI:10.15517/RBT.V69I3.46490.

Sunamura, T. (1989). Sandy beach geomorphology elucidated by laboratory modeling. in Lakhan. V.C. & Trenhaile. A.S. (eds) Elsevier Oceanography Series. 1st edn. Ontario, Canada: Elsevier pp. 159–213. DOI:10.1016/S0422-9894(08)70126-0.

Tanabe, L. K., Steenacker, M., Rusli, M. U. & Berumen, M. L. (2021). Implications of nest relocation for morphology and locomotor performance of Green Turtle (*Chelonia mydas*) hatchlings. *Ocean Coast. Manag.* 207. DOI:10.1016/j.ocecoaman.2021.105591.

Troëng, S. & Rankin, E. (2005). Long-term conservation efforts contribute to positive Green Turtle *Chelonia mydas* nesting trend at Tortuguero, Costa Rica. *Biol. Conserv.* 121: pp. 111–116. DOI:10.1016/j.biocon.2004.04.014.

Valadez, C., Silva, F. & Hernández, S. (2000). Proporción sexual en crías de la tortuga marina *Lepidochelys olivacea*, producida en corral de incubación en la playa de anidación La Gloria, Jalisco, Mexico. *Boletín del Cent. Investig. Biológicas* 34(3): pp. 305–313.

Vega, A. & Robles, Y. (2005). Descripción del proceso de anidación y biometría de hembras, huevos y nidos en Tortuga Golfina *Lepidochelys olivacea* (Eschscholtz, 1829) en Isla Cañas, Pacifico Panameño. *Tecnociencia* 7(2): pp. 43–55.

Vega, A. & Robles, Y. (2007a). Determinación del porcentaje de emergencia de neonatos en Tortuga Golfina *Lepidochelys olivacea* (Eschscholtz, 1892) en Isla Cañas, Pacífico Panameño. *Tecnociencia* 9(2): pp. 19–30.

Vega, A. & Robles, Y. (2007b). Evaluación del manejo de la Tortuga Golfina (*Lepidochelys olivacea*) en Isla Cañas, Pacífico Panameño. *Tecnociencia* 9(1): pp. 27–40.


Witherington, B., Hiram, S. & Mosier, A. (2011). Sea turtle responses to barriers on their nesting beach. *J. Exp. Mar. Bio. Ecol.* 401: pp. 1–6. DOI:10.1016/j.jembe.2011.03.012.


Xavier, R., Barata, A., Cortez, L. P., Queiroz, N. & Cuevas, E. (2006). Hawksbill turtle (*Eretmochelys imbricata*, Linnaeus 1766) and Green Turtle (*Chelonia mydas*, Linnaeus 1754) nesting activity (2002-2004) at El Cuyo beach, Mexico. *Amphib. Reptil.* 27(4): pp. 539–547. DOI:10.1163/156853806778877077.



ESTUDIO COMPARATIVO DEL MODELO DE LA ATMÓSFERA ESTÁNDAR APLICADO AL CASO PARTICULAR DE LA TROPÓSFERA EN LA REGIÓN DE EL CERRO, LAS TABLAS, PANAMÁ

N. M. Correa¹, A. Pino², A. Maturel³

¹Universidad de Panamá, Facultad de Ciencias Naturales, Exactas y Tecnología, Centro de Investigaciones con Técnicas Nucleares, Departamento de Física, Panamá. noriel.correa@up.ac.pa 

²Universidad de Panamá, Facultad de Ciencias Naturales, Exactas y Tecnología, Laboratorio de Física de la Atmósfera, Departamento de Física, Panamá. alfonso.pinog@up.ac.pa 

³Universidad de Panamá, Facultad de Informática, Electrónica y Comunicación, Panamá. alvaro.maturell@up.ac.pa 

Fecha de recepción: 21 de septiembre de 2022

Fecha de aceptación: 25 de octubre de 2022

RESUMEN

Se realizó una comparación entre el modelo estándar de la atmósfera, desarrollado en sus inicios por los Estados Unidos de Norte América y el modelo de la atmósfera en la región de El Cerro en la provincia de los Santos, localizado en la latitud $7,75^\circ$ y una longitud $-80,25^\circ$. Se seleccionó esta región por su alta convección. El estudio se llevó a cabo entre la NASA, la Universidad de Costa Rica y la Universidad de Panamá en el período comprendido entre los meses de julio y agosto del año 2007. Los datos fueron tomados con equipos de medición de última generación y utilizando Globo Sondas, para obtener, algunos parámetros atmosféricos, utilizados para predecir el cambio climático y su comportamiento en el tiempo. La comparación con el modelo estándar, del comportamiento de los parámetros atmosféricos, en la región objeto de estudio, se realizó a través de los perfiles de temperatura del aire, presión, humedad relativa y concentración de ozono mixto, y su variación con la altura. El comportamiento experimental de los parámetros atmosféricos medidos en la región de El Cerro, Provincia de Los Santos, se ajustan bastante bien a lo que predice el Modelo Estándar de la atmósfera, sin embargo, para el caso del perfil de temperatura-altitud, se manifiesta una doble pendiente, indicando que a la altura donde ocurre la inflexión, se tiene un proceso de inversión térmica por subsidencia en el cual el aire más frío se ubica por debajo de la zona de condensación mientras que el aire caliente se ubica

sobre esta región. El comportamiento experimental de los resultados de los perfiles de presión-altitud, son interpretados mediante un modelo matemático con una variación exponencial, como lo indica en modelo estándar.

PALABRAS CLAVES

Temperatura, humedad relativa, ozono mixto, tc4, perfiles de temperatura, presión atmosférica.

COMPARATIVE STUDY OF THE MODEL OF THE STANDARD ATMOSPHERE APPLIED TO THE PARTICULAR CASE OF THE TROPÓSHERE IN THE REGION OF EL CERRO, LAS TABLAS, PANAMA

ABSTRACT

A comparison was made between the standard model of the atmosphere, developed in its beginnings by the United States of North America and the model of the atmosphere in the El Cerro region in the province of Los Santos, located at latitude 7.75° and a length -80.25° . This region was selected for its high convection. The study was carried out between NASA, the University of Costa Rica and the University of Panama in the period between July and August of 2007. The data was taken with state-of-the-art measurement equipment and using Globo Sondes, to obtain, some atmospheric parameters, used to predict climate change and its behavior over time. The comparison with the standard model, of the behavior of the atmospheric parameters, in the region under study, was made through the profiles of air temperature, pressure, relative humidity and mixed ozone concentration, and its variation with height. The experimental behavior of the atmospheric parameters measured in the region of El Cerro, Province of Los Santos, fits quite well to what the Standard Model of the atmosphere predicts, however, in the case of the temperature-altitude profile, it manifests itself a double slope, indicating that at the height where the inflection occurs, there is a process of thermal inversion by subsidence in which the coldest air is located below the condensation zone while hot air is located on this region. The experimental behavior of the results of the pressure-altitude profiles are interpreted by means of a mathematical model with an exponential variation, as indicated in the standard model.

KEYWORDS

Temperature, relative humidity, mixed ozone, tc4, temperature profiles, atmospheric pressure.

INTRODUCCION

El Cerro es un pueblo ubicado a 3,4 km de la comunidad de Las Tablas y a 35 km de la comunidad de Chitré en la provincia de Los Santos localizado en la latitud $7,75^{\circ}$ y una longitud $-80,25^{\circ}$. La provincia de Los Santos se encuentra ubicada a unos 275 km de la capital de la República de Panamá.

La identificación y cuantificación de procesos clave en esta región es esencial para progresar en temas que involucran el cambio climático, la reducción del ozono y la química troposférica (Mike Craig, 2008).

La NASA llevó a cabo medidas terrestres y aéreas en una misión denominada TC4 (Tropical Composition, Cloud and Climate Coupling), para obtener información que se pudiera utilizar en los modelos climáticos globales, en especial en la formación de nubes. (Chirica, NASA-ESPO Tropical Compositio Cloud and Climate Coupling, 2008)

En total, más de 400 científicos, ingenieros, personal de la misión y de apoyo estuvieron destacados en Costa Rica y Panamá desde mediados de julio hasta mediados de agosto de 2007. (Owen B. Toon, 2007)

Este gran experimento internacional reunió a investigadores de ocho centros de la NASA, más de 14 universidades y más de 20 agencias estadounidenses e internacionales, siendo un estudio muy bien estructurado de nuestro ambiente.

La misión fue patrocinada por el Área Enfocada en la Composición Atmosférica de la División de Ciencia Terrestre de la NASA, conformada por el Programa de Investigación Atmosférica Superior, el Programa Científico de Radiación y el Programa de Química Troposférica.

La misión TC4 de la NASA investigaba la estructura, las propiedades y procesos en el pacífico oriental del trópico. La química, la dinámica y los procesos físicos que ocurren en la baja tropósfera tropical no están muy estudiados. El estudio se llevó a cabo en el Golfo de Panamá y lugares circundantes, ya que, es en esta región, en donde la convección es muy persistente. (L Pfister, 2009)

La Atmósfera Estándar ICAO o ISA es un estándar contra el cual se compara la atmósfera actual en cualquier punto y tiempo. Los parámetros utilizados por ISA para su estandarización, a nivel del mar, son (Lhotellier, 2017):

- Presión: 1013,25 hPa
- Temperatura: +15°C.

Cada uno de estos parámetros decrece cuando aumenta la altitud de referencia del nivel medio del mar:

- 1hPa perdido cada 8 metros
- 6,5°C perdido cada kilómetro
- Cuando la altitud está sobre los 11 km, la temperatura es de -56,6°C y constante hasta alcanzar los 20 km.

MATERIALES Y METODOS

Para realizar el estudio se utilizaron tres aviones de la NASA (DC-8, WB-57 y ER-2) que volaron desde el Aeropuerto Internacional Juan Santamaría, en Costa Rica (Chirica, TC4 Gallery, 2017). Se utilizaron más de 66 instrumentos, altamente especializados, que recolectaron información en el sitio, mediante sensores remotos. Complementos terrestres como un radar banda C, instalado en el aeropuerto en Costa Rica brindó información del clima local, así como un gran radar Polarimétrico de banda S y un remolque de investigación atmosférica localizado en Las Tablas, cerca al Golfo de Panamá (Fig. 1). En el cuadro 1, detallamos el listado de la instrumentación empleada en esta investigación.



Fig. 1 Radar Polarimétrico de banda S utilizado por la NASA para el proyecto TC4 ubicado en la región de El Cerro, Las Tablas, provincia de Los Santos (Toon, Starr, & Jensen, 2010) Fig. 1 Radar Polarimétrico de banda S utilizado por la NASA para el proyecto TC4 ubicado en la región de El Cerro, Las Tablas, provincia de Los Santos (Toon, Starr, & Jensen, 2010).

Cuadro 1. Instrumentación utilizada en la investigación por la NASA en el estudio sobre TC4 (Toon, Starr, & Jensen, 2010).

Instrumentos satelitales	
Instrumento	satélite
OMI	A (Toon, Starr, & Jensen, 2010)ura
TES	Aura
HIRDLS	Aura
MLS	Aura
CALIOP	CALIPSO
Radar de perfilado de nubes	CloudSat
MODIS	Terra
MODIS	Aqua
Radar de precipitaciones, generador de imágenes de microondas	TRMM
Generador de imágenes visible e infrarroja	GOES 10/12
Instrumentos en el NASA ER-2	

CPL	Lidar de física de nubes (532, 1064 nm)
CRS	Sistema de radar en la nube (94 GHz)
EDOP	ER-2 Radar Doppler (X band)
AMPR	Radiómetro de precipitación de microondas avanzado (10.7, 19.4, 37, 89 GHz)
MAS/MASTER	MODIS, MODIS-ASTER Simulador aerotransportado (VIS/NIR/SWIR/IR espectrómetro)
CoSSIR	Escaneo cónico sub-mm Radiómetro de imágenes de ondas (183–874 GHz)
S-HIS	Escaneo de alta resolución Sonda de interferómetro (3–18 mm)
BB IR	Radiómetro de banda ancha (4–42 mm)
SSFR	Radiómetro de flujo espectral solar (VIS-SWIR)
MTP	Perfilador de temperatura de microondas
MVIS	Video Cámara
Instrumentos en tierra para medición de Agua e instrumentos de partículas	
CLH	Higrómetro láser de trayectoria cerrada
Frostpoint (FP)	Higrómetro de punto de escarcha
H2Ov	Vapor de agua
HOxotope	HOx/Isotopo
ICOS	Espectrómetro de cavidad integrada
JLH	JPL Higrómetro láser
2DS	Sonda 2D-S
CAPS	Espectrómetro de nubes, aerosoles y precipitaciones
CDP	Sonda de gota de nube
CEM	Transmisómetro
CPI	Generador de imágenes de partículas en la nube
CSI	Impactador de espectrómetro de nubes
FCAS	Espectrómetro de aerosol de cavidad focalizada
NMASS	Espectrómetro de tamaño de aerosol en modo núcleo
SP2	Fotómetro de partículas individuales
Instrumentos para la medición de trazas de gas, estado atmosférico e instrumentos de censado remoto	
Argus	Espectrómetro láser de diodo
NO/NO_y	Quimioluminiscencia de óxido nítrico/NO _y
O3	Ozono
PANTHER	Cromatógrafo de gas
CO₂	Harvard CO ₂

UAS O3	Ozono
WAS	Muestreador de aire completo
MMS	Transductor de presión y sonda de temperatura Paul Bui, NASA ARC
P/T	Presión y temperatura
CAFS	Espectrómetro de flujo actínico
ACAM	Cámara digital
Instrumentos a bordo del DC-8	
DLH	TDL de ruta abierta
2D-S, CPI	Sondas en la nube
LARGE	Espectrómetros de aerosoles
PALMS	Espectrómetro de masas de composición de partículas
CAPS, PIP	Sondas en la nube
CVI	Impactador virtual de contraflujo
CIMS	Espectrómetro de masas de iones químicos
DACOM	TDL (DACOM)
FAST OZ	Sonda de ozono de quimioluminiscencia
MACDON-NA SAGA	Cámara de niebla del analizador de gases IR
NO	Óxido nítrico de quimioluminiscencia
TD-LIF	Láser de diodo sintonizable
WAS	Muestreador de aire completo
Dropsondes	Sonda atmosférica
MMS	Sonda de presión y temperatura
APR-2	Radar de precipitación
LASE	IR Lidar
DIAL	UV Lidar
BB IR	Radiómetro de banda ancha
CAFS	Flujo actínico UV-Vis
SSFR	Radiómetro de flujo espectral solar
Instrumentos en tierra y Balones	
Ticosonde	
CFH-ozonesondes	
NATIVE	
SMART	
NPOL	
NATIVE	

Para el estudio, se tomó la información, disponible, desde el sitio <http://www.espo.nasa.gov/tc4>, la cual está en formato de texto y se creó una base de datos en Microsoft Structured Query Language (MSSQL).

Esta base de datos nos permitió el manejo más ágil y preciso, de los diferentes parámetros atmosféricos medidos en dicho estudio.

Los datos originales utilizados son los correspondientes al acrónimo TC4, Sonde (<http://espoarchive.nasa.gov/archive/browse/tc4/Sonde> (Drdla, 2017)). Una vez obtenido los archivos planos, se procedió a ubicar aquellos correspondientes a la región de Las Tablas. En la base de datos se creó una tabla con los nombres de los parámetros atmosféricos registrados (tiempo, presión, altitud, temperatura, humedad relativa, ozono parcial, mezcla de ozono, dirección del viento, rapidez del viento, latitud, longitud, ubicación, fecha data).

RESULTADOS

Al estudiar y catalogar la información disponible para realizar el estudio se procedió a obtener los perfiles de temperatura para la región en estudio, este caso la troposfera.

Se puede apreciar de la Fig. 2 que existe un cambio de pendiente alrededor de los 8 km de altitud. Debido a que en el ISA no se prevé este tipo de comportamiento en la troposfera, se decidió realizar un estudio detallado de los perfiles antes de los 8 km de altitud y después de los 8 km de altitud.

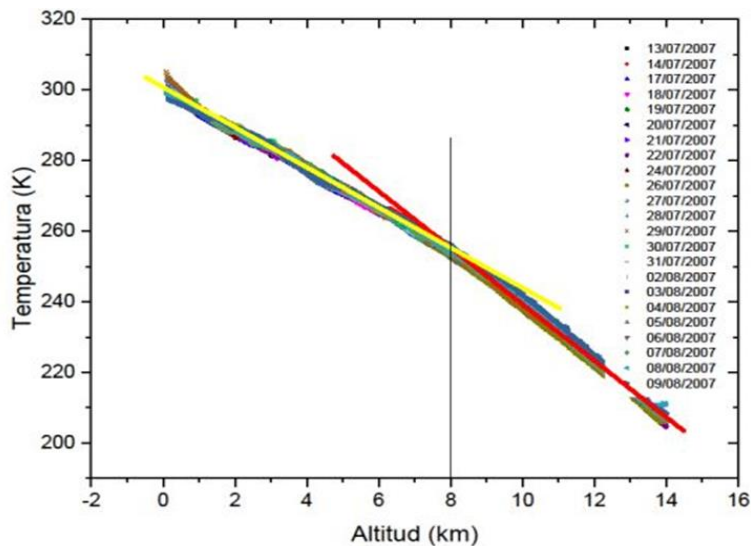


Fig. 2 Perfil de temperatura para los días en que se llevó a cabo el estudio en la región de Los Santos por parte de la NASA, Física de la Atmósfera (UP) y la Universidad de Costa Rica.

Al utilizar un modelo matemático lineal, se puede apreciar que los perfiles correspondientes a la primera sección, antes de los 8 km, se comportan como lo establece el ISA, Fig. 3

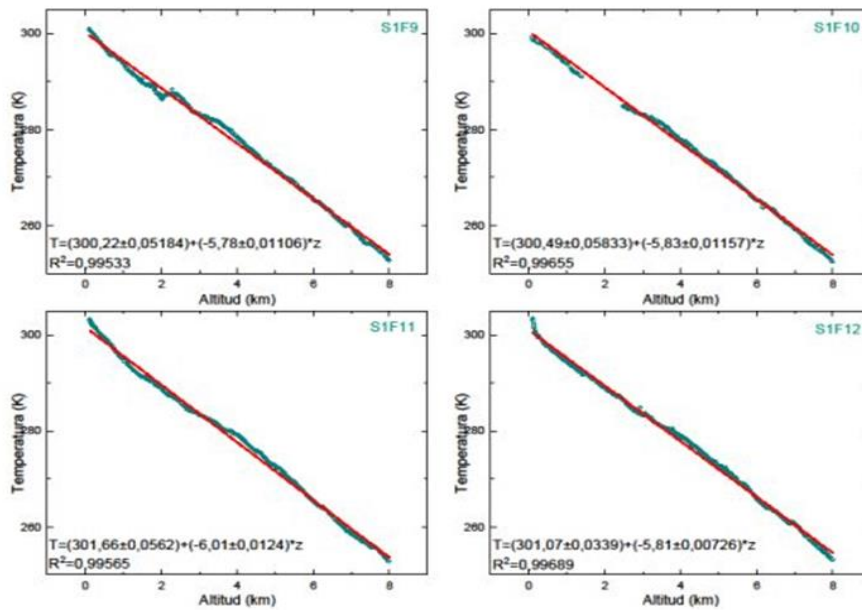


Fig. 3 Ajuste de la primera parte de los espectros de temperatura-altitud, para los días de estudio.

En el cuadro 2, se observan los comportamientos para los perfiles de temperatura en las diferentes fechas, y en la Fig. 4 podemos observar que la media de dichas pendientes es de -5,65 K/km.

Cuadro 2. Valores de pendiente, error absoluto y coeficiente de correlación obtenidos de los ajustes de la primera parte de los perfiles correspondientes a las fechas de estudio.

Día	Pendiente (K/km)	Desviación Estándar	Coefficiente de correlación	Día	Pendiente (K/km)	Desviación Estándar	Coefficiente de correlación
1	-5,69	0,01	0,998	13	-5,95	0,01	0,995
2	-5,33	0,01	0,997	14	-5,73	0,01	0,998
3	-5,65	0,01	0,999	15	-5,64	0,01	0,997
4	-5,69	0,01	0,998	16	-5,68	0,01	0,998
5	-5,48	0,01	0,996	17	-5,72	0,01	0,999
6	-5,42	0,01	0,999	18	-5,69	0,01	0,998
7	-5,41	0,01	0,999	19	-5,78	0,01	0,987
8	-5,47	0,01	0,999	20	-5,61	0,01	0,997
9	-5,78	0,01	0,995	21	-5,56	0,01	0,994
10	-5,83	0,01	0,997	22	-5,62	0,01	0,999
11	-6,01	0,01	0,996	23	-5,45	0,01	0,989
12	-5,81	0,01	0,997				

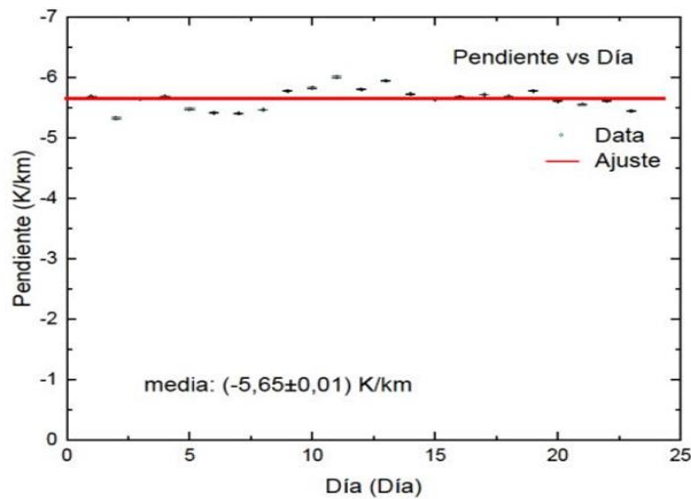


Fig. 4 Gráfico de las pendientes de la primera parte de los perfiles temperatura-altitud en función de los días de estudio.

En la Fig. 5 tenemos una muestra de los perfiles de temperatura para los días en estudio correspondientes a las altitudes entre 8 km y 14 km, y en el cual también se puede apreciar un comportamiento lineal.

Todos los valores de los ajustes obtenidos para cada perfil se observan en el cuadro 3, y en la Fig. 6 se obtiene una media de $-8,16 \text{ K/km}$ para los perfiles de la Fig. 5.

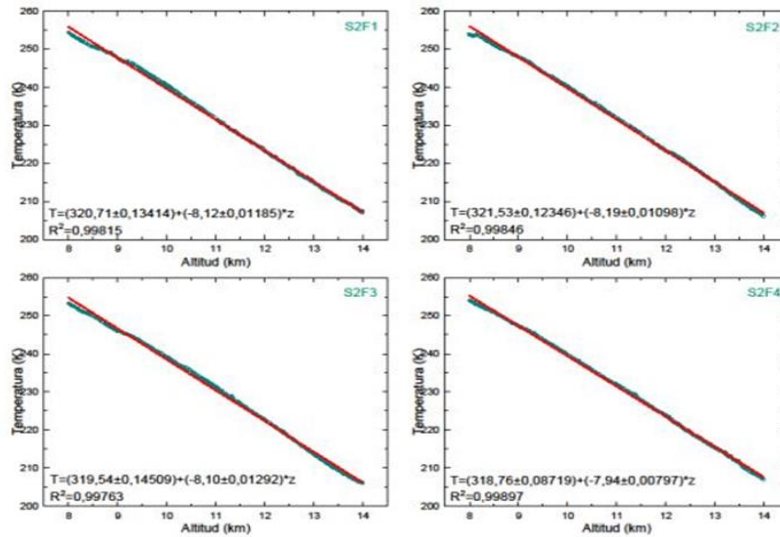


Fig. 5 Ajuste de la segunda parte de los espectros de temperatura-altitud, para los días de estudio.

Cuadro 3. Valores de pendiente, error absoluto y coeficiente de correlación obtenidos de los ajustes de la segunda parte de los perfiles correspondientes a las fechas de estudio.

Día	Pendiente (K/km)	Desviación Estándar	Coefficiente de correlación	Día	Pendiente (K/km)	Desviación Estándar	Coefficiente de correlación
1	- 8,12	0,01	0,998	13	-7,91	0,01	0,999
2	-8,19	0,01	0,998	14	-8,04	0,01	0,997
3	-8,10	0,01	0,998	15	-8,08	0,01	0,997
4	-7,94	0,01	0,999	16	-8,05	0,01	0,999
5	-8,19	0,01	0,999	17	-8,13	0,01	0,996
6	-8,42	0,01	0,998	18	-8,27	0,01	0,998
7	-8,41	0,01	0,998	19	-8,25	0,01	0,998
8	-8,46	0,01	0,999	20	-8,23	0,01	0,998
9	-8,9	0,01	0,999	21	-8,10	0,01	0,998
10	-8,04	0,01	0,999	22	-7,91	0,01	0,997
11	-8,01	0,01	0,997	23	-8,19	0,01	0,997
12	-7,82	0,01	0,999				

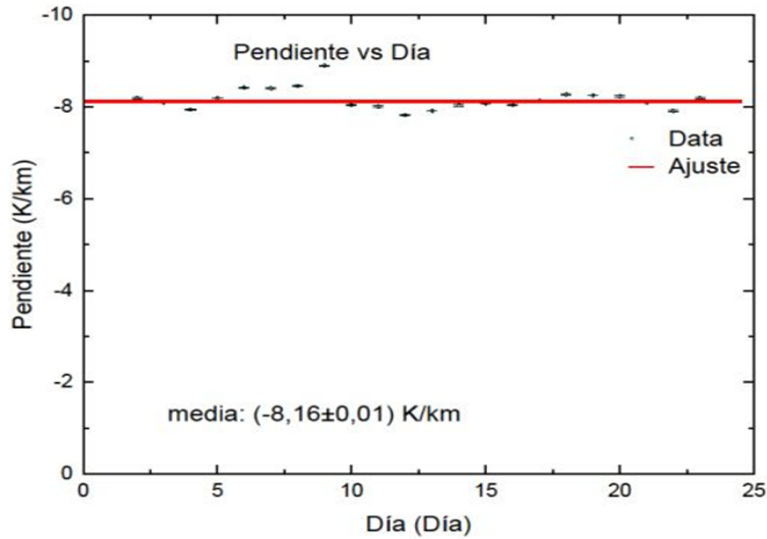


Fig. 6 Gráfico de las pendientes de la segunda parte de los perfiles temperatura-altitud en función de los días de estudio.

Con estos resultados podemos decir que existe un marcado cambio de pendiente en los perfiles de temperatura para la región en estudio y el mismo se puede apreciar en la Fig. 7

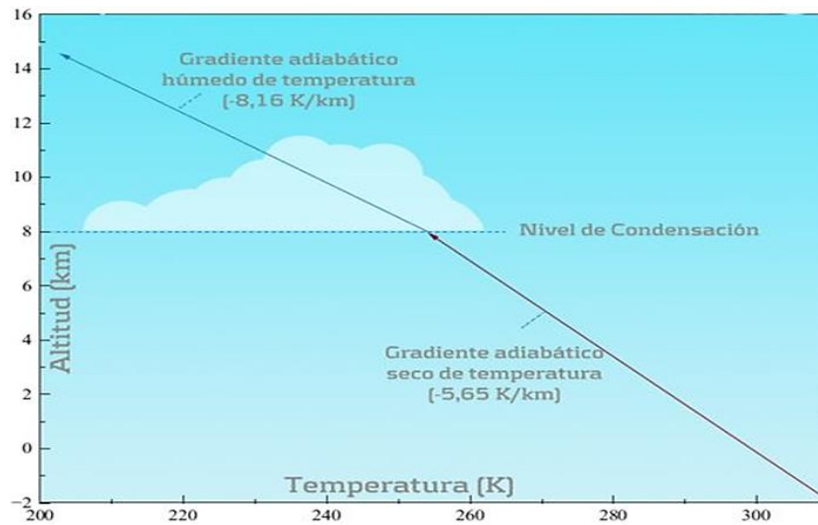


Fig. 7 Explicación probable a la presencia de la doble pendiente en los perfiles de temperatura en función de la altitud.

Al observar la Fig. 8 se tiene una muestra de los perfiles de presión que se obtuvieron durante el muestreo realizado durante la ejecución del proyecto TC4. En los mismos se puede apreciar que el comportamiento es el que nos indica la ISA.

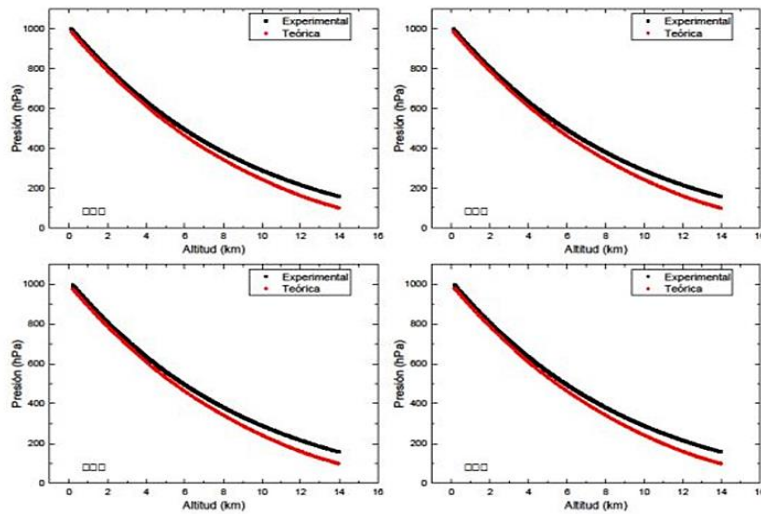


Fig. 8 Perfiles de presión en función de la altitud para algunas fechas del estudio realizado.

Utilizando un modelo matemático exponencial se obtuvieron los ajustes de los perfiles de presión mostrados en la Fig. 9 y mostrados en el cuadro 4. Luego de ello, y utilizando un software para el tratamiento de datos experimentales, se obtiene una presión media de $1,119 \times 10^3$ hPa.

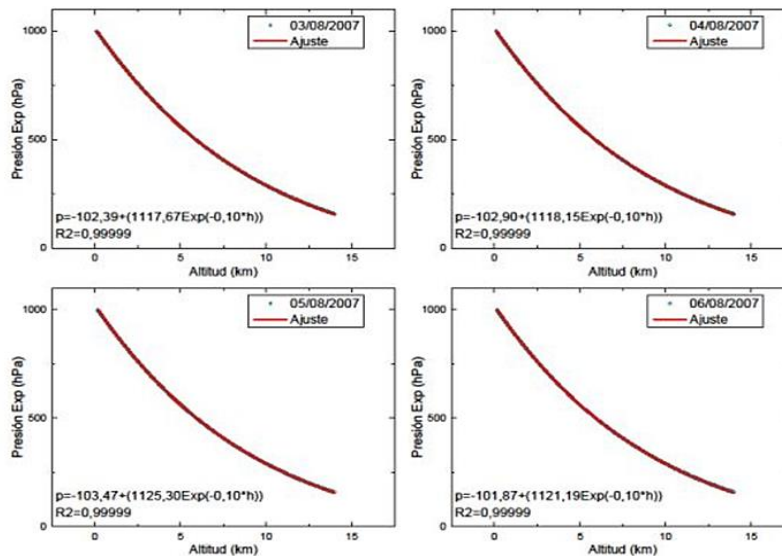


Fig. 9 Ajuste de los perfiles de presión en función de la altitud para algunas fechas del estudio.

Cuadro 4. Valores del intercepto, presión inicial y coeficiente de correlación de los perfiles de presión en función de la altitud para el área de estudio en las fechas asignadas, correspondiente al mes de julio-agosto de 2007

Día	Intercepto (hPa)	P0 (x 10 ³) (hPa)	Coefficiente de correlación	Día	Intercepto (hPa)	P0 (x 10 ³) (hPa)	Coefficiente de correlación
1	100,8	1,111	0,999	12	107,3	1,120	0,999
2	100,1	1,116	0,999	13	101,8	1,116	0,999
3	102,0	1,119	0,999	14	103,6	1,119	0,999
4	102,2	1,121	0,999	15	102,4	1,118	0,999
5	102,1	1,118	0,999	16	102,9	1,118	0,999
6	101,0	1,126	0,999	17	103,5	1,125	0,999
7	101,5	1,118	0,999	18	101,9	1,121	0,999
8	102,8	1,122	0,999	19	101,8	1,120	0,999
9	106,0	1,116	0,999	20	102,7	1,115	0,999
10	106,0	1,121	0,999	21	101,0	1,117	0,999
11	106,7	1,121	0,999				
Media del Intercepto = 102,8 x 10³ hPa				Media de P0 = 1,119 x 10³ hPa			

CONCLUSIONES

Esta investigación se llevó a cabo, en la región de la atmósfera, denominada tropósfera, ya que, es aquí, en donde se dan la mayoría de los procesos atmosféricos que inciden directamente con los seres humanos.

Los perfiles de temperatura en función de la altitud, para las fechas del 13 de julio del 2007 al 8 de agosto del 2007, muestran la presencia de una doble pendiente, alrededor de los ocho kilómetros (8 km), en contraste con lo expuesto por el modelo de la atmósfera estándar, que indica, que esta es una zona en la cual se da un comportamiento lineal. El comportamiento en cada una de las regiones, antes y después de los 8 km, es lineal.

Ésta doble pendiente puede ser entendida observando el pico relativo que se presenta en los perfiles de humedad relativa – altitud debido a los procesos convectivos que se presentan en la región comprendida entre los 6 km y 8 km; con esto se tiene un proceso de inversión térmica por subsidencia en el cual el aire más frío se ubica por debajo de la zona de condensación mientras que el aire caliente se ubica sobre esta región. El comportamiento de la atmosfera para altitudes inferiores a los 8 km, en el área de estudio es lineal entre la temperatura y la altitud; la tasa de variación de la temperatura con la altitud determina el gradiente adiabático seco. En nuestro estudio obtuvimos un valor para este gradiente de $(-5,65 \pm 0,01)$ K/km.

A partir de los 8 km hacia arriba, se inicia el proceso de condensación; en este punto se determina la elevación del nivel de condensación (LCL), por sus siglas en inglés. De aquí en adelante se puede llevar a cabo la formación de las nubes; para ello la parcela de aire inicia su proceso de saturación, que trae como consecuencia, la condensación. Para este estudio se pudo determinar que a partir de los 8 km hacia arriba se tiene un valor de $(-8,16 \pm 0,01)$ K/km para el gradiente adiabático húmedo.

Sí obtenemos el valor medio de los valores del gradiente adiabático húmedo y el gradiente adiabático seco obtenemos un valor de 6,86 K/km, lo que está próximo al del modelo estándar de la atmósfera, 6,5 °C/km, con un error porcentual de aproximadamente 5%.

Desarrollando la matemática para una parcela de aire, con los alrededores a la misma temperatura, y utilizando la ecuación de Clausius-Clapeyron se puede obtener que el gradiente adiabático húmedo, siempre es menor que el gradiente adiabático seco; esto explica la existencia de una aparente doble pendiente en el gráfico de temperatura en función de la altitud para la troposfera de la región en estudio.

Al estudiar los perfiles de presión en función de la temperatura, se muestra que los datos experimentales, pueden ser ajustados, con una buena aproximación, utilizando un modelo matemático, dado por la ecuación de la ISA. Además, se observa que, a medida que se va incrementando la altitud, la densidad de aire decrece (Ahrens, 2011).

Así mismo, se puede concluir, que los perfiles de presión en función de la altitud, para la región de estudio, se comportan de la siguiente forma $p = (-102,85 + 1119,36e^{-0,10h}) \text{ hPa}$. Lo que está de acuerdo con lo predicho por el modelo de la atmósfera estándar.

Al comparar el modelo experimental y el teórico de la presión en función de la temperatura, se observa que las curvas inician unidas, pero al ir incrementándose la altitud las mismas se van separando. Esto se debe a que, según el modelo estándar, la presión decrece con la altitud y, además, depende la constante de los gases; a medida que se va aumentando la altitud, las moléculas se van haciendo más pesadas, lo que trae como consecuencia un menor valor para la constante de los gases. En otras palabras, a altas temperaturas, tenemos moléculas más energéticas.

REFERENCIAS

Ahrens, C. (2011). *Essentials of Meteorology An Introduction to the Atmosphere*. Belmont, CA: Brooks Cole, Cengage Learning.

Chirica, D. (2008, Julio 8). *NASA-ESPO Tropical Compositio Cloud and Climate Coupling*. Retrieved from NASA-ESPO: https://cloudl.arc.nasa.gov/tc4_esp/

Chirica, D. (2017, Abril 22). *TC4 Gallery*. Retrieved from TC4 Science: <https://espo.nasa.gov/tc4/mission-gallery>

Drdla, K. (2017, Abril 22). *TC4 Sonde files*. Retrieved from TC4 Science: <https://espoarchive.nasa.gov/archive/browse/tc4/Sonde>

L Pfister, H. B. (2009, Septiembre 17). *TC4 Science Papers*. Retrieved from https://cloud1.arc.nasa.gov/tc4/docs/papers/Selkirk_et_al-Tropical_UTLS_water_vapor_and_ozone-Submission.pdf

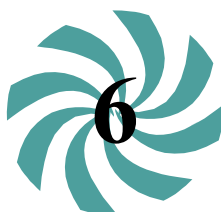
Lhotellier, E. (2017, Diciembre 16). *International Standard Atmosphere*. Retrieved Octubre 9, 2018, from https://www.iviao.aero/training/documentation/books/Student_ISA.pdf

Mike Craig. (2008, Julio 8). *ESPO-TC4-Mapas*. Retrieved from NASA-ESPO; Tropical Composition Cloud and Climate Coupling: http://www.espo.nasa.gov/tc4/map_panama.php

Owen B. Toon, D. O. (2007). *Planning and Implementation of the Tropical Composition, Cloud and Climate Coupling Experiment (TC4)*.

Retrieved from TC4 Science Papers: https://cloud1.arc.nasa.gov/tc4/docs/papers/TC4_mission_overview-1.pdf


Toon, O. B., Starr, D. O., & Jensen, E. J. (2010). Planning, implementation, and first results of the Tropical Composition, Cloud and Climate Coupling Experiment (TC4). *JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH*, 1-33.



RESTAURACIÓN CON MANGLE PIÑUELO (*Pelliciera rhizophorae*) DE ÁREAS ALTERADAS EN EL BOSQUE INUNDABLE DE MANGLAR EN UNA REGIÓN DEL PACÍFICO.

José A. Berdiales¹, Carlos González² y Aracelly Vega³

¹Tecno Manglares Forest, Panamá, Panamá. ja_berdiales@yahoo.com 

²Universidad Autónoma de Chiriquí, Panamá. carlos.gonzalez5@unachi.ac.pa 

³Universidad Autónoma de Chiriquí, Centro de Investigación en Recursos Naturales, Panamá. aracelly.vega@unachi.ac.pa 

Fecha de recepción: 21 de septiembre de 2022

Fecha de aceptación: 25 de octubre de 2022

RESUMEN

En la vertiente del pacífico panameño se encuentran alrededor de unas 170 000 hectáreas de bosque de manglar de las cuales los manglares ocupan el 25 % de la superficie existente. El trabajo tuvo como finalidad la rehabilitación de 33 hectáreas en el bosque inundable, en él se determinó la ubicación del polígono georreferenciado para el diseño de un mapa cartográfico. Esta restauración se realizó con la especie *Pelliciera rhizophorae* producida en vivero. El sitio seleccionado para la restauración estuvo invadido por el helecho *Acrostichum aureum* el cual fue cortado con machete previamente y luego se procedió a la restauración con 20 592 plántones en el periodo de junio del 2013. El año siguiente se establecieron 18 parcelas de monitoreo distribuidas al azar dentro del polígono de las 33 hectáreas. A partir del 2014 y hasta el 2017, se midieron 900 arbolitos de *Pelliciera*. La altura promedio que alcanzaron los árboles fue de 205,1 cm promedio y hubo un 1,7 % de mortalidad. El *Acrostichum* fue controlado a medida que iban creciendo los plántones de mangle piñuelo durante 4 años y los resultados durante los cinco años es que se pudo estabilizar el equilibrio ecológico del ecosistema de manglar.

PALABRAS CLAVES

Restauración, bosque inundable, *Pelliciera rhizophorae*, manglares, *Acrostichum aureum*.

RESTORATION WITH PIÑUELO MANGROVE (*Pelliciera rhizophorae*) OF ALTERED AREAS IN THE FLOODED MANGROVE FOREST IN A PACIFIC REGION.

ABSTRACT

On the Panamanian Pacific slope there are around 170 000 hectares of mangrove forest, of which mangroves occupy 25 % of the existing surface. The purpose of the work was the rehabilitation of 33 hectares in the floodable mangrove forest in which the location of the polygon was determined, which was geo-referenced for the design of a cartographic map. This restoration was carried out with the *Pelliciera rhizophorae* species produced in the nursery. The site selected for the restoration was invaded by the fern *Acrostichum aureum* which was previously cut with a machete and then proceeded to the restoration with 20 592 seedlings in the period of June 2013. The following year, 18 randomly distributed monitoring plots were established within the 33-hectare polygon. From 2014 to 2017 900 *Pelliciera* trees were measured. The average height reached by the trees was 205,1 cm and there was 1,7% mortality. The *Acrostichum* was controlled as the piñuelo mangrove seedlings grew for 4 years and the results during the five years is that the ecological balance of the mangrove ecosystem could be stabilized.

KEYWORDS

Key word: restoration, floodplain forest, *Pelliciera rhizophorae*, mangrove, *Acrostichum aureum*.

INTRODUCCION

Los manglares se localizan al sur de la ciudad de David, en la desembocadura del río Chiriquí; ocupan 1,6 % de esta cuenca. Entre los beneficios que ofrece este ecosistema está la protección de la costa contra la erosión provocada por el oleaje y el viento, la moderación de los efectos producidos por tormentas costeras y ciclones, constituyendo, además, el refugio y hábitat para una amplia diversidad de vida silvestre, especialmente avifauna. En Panamá se cuenta con dos de las diecinueve especies de Rhizophorae; dos de las ocho de Avicennianaceae, dos de las cinco Combretaceae; y la única Pellicieraceae en el continente. Esta última se encuentra tanto en el Atlántico como en el Pacífico panameño. De igual forma se encuentra el *Acrostichum aureum* de la familia Pteridaceae.

El problema de la población de mangle piñuelo (*Pelliciera rhizophorae*) en el estero Pedregal, sobre una superficie de 1 800 hectáreas, puede atribuirse, especialmente, al aumento de la población, la ganadería y la agricultura extensiva en detrimento del bosque de manglar. El objetivo de esta investigación fue determinar el crecimiento del mangle piñuelo en una zona donde una especie de helecho se ha convertido en una amenaza en su hábitat. La participación comunitaria jugó un rol muy importante en la integración de miembros de la comunidad de Pedregal, en la ejecución de la restauración de unas 33 hectáreas de manglar.

Pelliciera rhizophorae (mangle piñuelo) es una especie que tiene una distribución limitada y desigual, en Nicaragua (Bluefields), Panamá (Bocas del Toro, Bahía las Minas) y Colombia (bahías de Cartagena y Barbacoa). También hay algunos parches pequeños de esta especie en las costas del Pacífico de Colombia, Costa Rica, Panamá y Ecuador (Fuchs, 1970; Jiménez, 1984) y el suroeste de Nicaragua. El área de ocupación de esta especie se estima entre 500 km² y 2 000 km²; es una especie nativa de Colombia, Costa Rica, Ecuador, Nicaragua, Panamá. La biología de la población de esta especie no ha sido estudiada con gran detalle. Las poblaciones son generalmente pequeñas y están restringidas a una banda estrecha de salinidad. Es un árbol pequeño (5-10 m) que crece en sustratos fangosos con cantidades variables de arena y turba de manglar, ocasionalmente con fragmentos de coral. Su presencia está vinculada a un suministro de agua dulce. Es un componente menor de las áreas no perturbadas, pero se convierte en una densa población en las áreas donde se eliminaron los árboles si se dispone de agua dulce (Caldern-Saenz, 1984). *Pelliciera* puede ser más sensible a las altas salinidades del suelo que otros manglares neotropicales. Crece mejor en suelos húmedos, inundados superficialmente en mareas altas y en suelos firmes, arenosos y ligeramente elevados que se encuentran en las áreas de intercambio. Esta especie no se encuentra en las salinidades del suelo superiores a 37 ppt (Winograd, 1983; Jiménez, 1984). Esta especie tiene una distribución restringida, probablemente reducida. En un estudio realizado a principios de la década de 1990 en Nicaragua, solo unos pocos individuos de *P. rhizophorae* se registraron en Bluefields. Los informes incluyeron diez plántulas y un árbol joven en 0,15 ha, pero no adultos en esta localidad (Roth and Grijalva, 2016).

En Colombia, *P. rhizophorae* se encuentra en la bahía de Cartagena en el lado sur cerca del río y en la bahía de Barbacoas (Caldern-Saenz, 1984). En Panamá, *P. rhizophorae* se encuentra en Bahía Las Minas, donde ocurre como individuos aislados dentro de un manto de aproximadamente 1 200 hectáreas (Duke, Pinzón M. and Prada T, 1997). En la costa del Pacífico de Costa Rica, esta especie se encuentra en Tamarindo y Puntarenas, dentro de una distribución estimada de dos hectáreas (Ellison, Farnsworth and Moore, 2010).

Pelliciera fue incluido como Vulnerable en la Lista Roja de Plantas Amenazadas de la UICN de 1997, pero no fue evaluado para su inclusión en la Lista Roja de árboles amenazados de la UICN de 1998.

El *Acrostichum aureum* es una especie oportunista que se desarrolla después de la tala de árboles, se adapta en suelos salobres y puede alcanzar una altura de hasta 2 m. En muchas partes del mundo ha sido considerada una plaga vegetal que interfiere con el crecimiento y regeneración de los árboles de mangle (Medina *et al.*, 2014).

Esta experiencia es la primera que se realiza en Panamá con la especie *Pelliciera rhizophorae* en la recuperación de ecosistemas afectados por actividades antrópicas.

MATERIALES Y METODOS

El proyecto se realizó en los manglares de Pedregal, provincia de Chiriquí, situados en la llanura litoral del Pacífico, a unos 24,4 m sobre el nivel del mar. Las costas, en general, son bajas, pantanosas y cubiertas por manglares. Su principal accidente costero es el amplio golfo de Chiriquí, de aguas profundas, que se extiende desde Punta Burica hasta Las Palmas, en Veraguas, abarcando toda la costa de la provincia chiricana (Trejos *et al.*, 2007).

El clima donde se ubica el proyecto mantiene una temperatura media anual registrada de 26 °C y la estación lluviosa se caracteriza por una precipitación entre 2 000 y 3 400 milímetros de lluvia por año. Cuenta también con una estación seca definida. Entre las especies de mangle encontradas están: mangle piñuelo (*Pelliciera rhizophorae*), alcornoque (*Mora oleífera*) y sangrillo (*Pterocarpus officinalis Jacq*). También se encuentran otras especies como la negra jorra (*Acrostichum aureum*),

lirio de manglar (*Crinum* sp.) y mangle marica (*Tabebuia palustris*) que crecen y se desarrollan en asociados en las desembocaduras de los ríos, especialmente en bosque de ciénaga.

Morfología del ecosistema de manglar

El sitio seleccionado para la restauración de las 33 hectáreas siguió los parámetros de morfología del lugar, como la topografía, hidrología, ecología, similar unidad de hábitat del manglar y propiedades del suelo, como la concentración de salinidad edáfica y el estado de las mareas (Twilley and Rivera-Monroy, 2014) (figura 1).

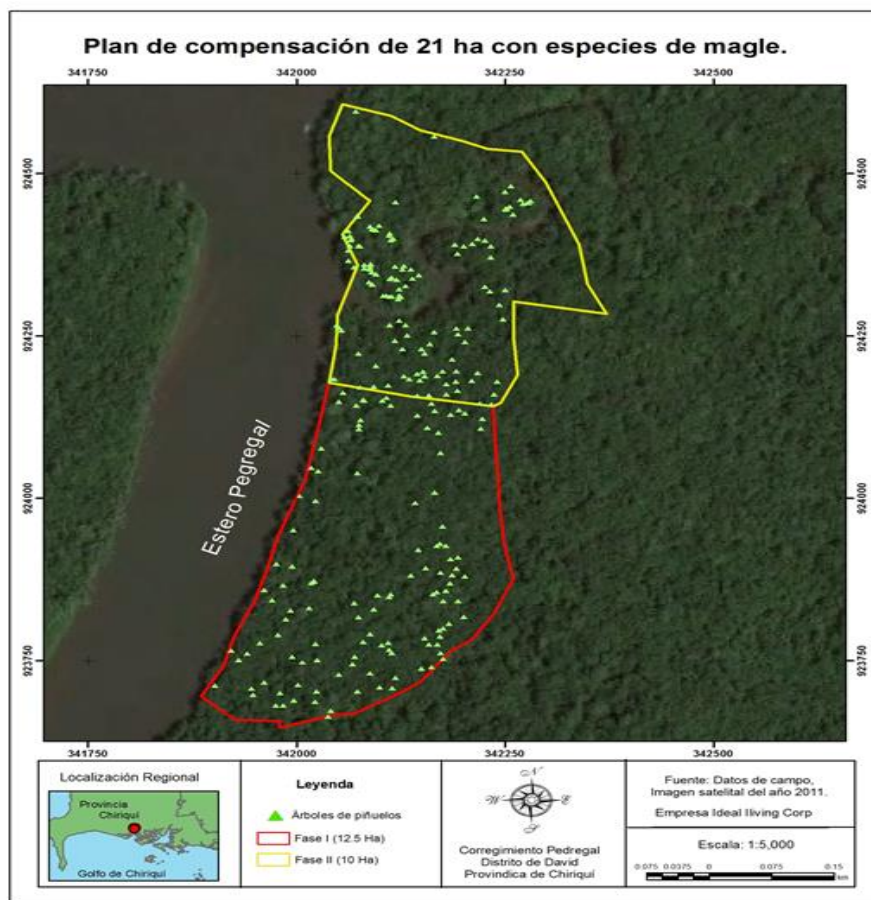


Fig. 1 Localización y vista área del bosque inundable. Árboles adultos de mangle piñuelo representados en color verde caña.

Metodología

La restauración se realizó cerca del estero Pedregal en un polígono de 33 hectáreas, ubicadas en el bosque inundable que tiene unas 1 800 hectáreas (Tovar, 2008).

Las actividades realizadas para recuperar la población de mangle piñuelo en el estero Pedregal fueron las siguientes:

Se geo referenció la zona con la técnica de posicionamiento espacial de una entidad en una localización geográfica única y bien definida bajo un sistema de coordenadas y datum específicos. Es una operación habitual dentro de un sistema de información geográfica (SIG). A través de esta herramienta se levantaron las coordenadas con un GPS marca Garmin, serie eTrex 20 y un error de 3 m aceptables. Las coordenadas fueron tomadas en el sistema WGS84, Canal Zone 17, coordenadas UTM. Una vez georreferenciado el sitio se procede a analizar la información, se descargan las coordenadas y se ubica una imagen satelital para identificar otros sitios no vistos en campo, es allí cuando se inició el procesamiento y depuración de datos. Toda la periferia del polígono fue señalizada cada 100 metros con cintas plásticas adhesivas.

Reforestación. Actividades realizadas:

Se confeccionó un vivero de mangle, para el que se seleccionó un área cerca de un estero, con condiciones del terreno planas, con el propósito de permitir la entrada y salida del agua a través de la subida de las mareas. Esta área se ubica en la comunidad de Pedregal, distrito de David.

La recolección de las semillas se hizo a lo largo de una semana, en forma manual. En total se recolectaron 20 625 semillas maduras de mangle piñuelo durante la marea baja. Estas fueron colocadas en tanques plásticos de 5 galones, y posteriormente fueron trasladadas en bote al vivero.

En el vivero se colocaron, en el suelo o en el fango del manglar, varas de dos metros de ancho por siete metros de largo, denominando a esta estructura camas germinativas las cuales se colocaron a una profundidad de 5 cm. Se construyeron, en total, doce camas germinativas dejando un metro de separación entre camas. Estas camas fueron, posteriormente,

rellenadas con fango como sustrato para el crecimiento del mangle piñuelo. Este fango fue transportado en bote desde el área donde había un desarrollo de árboles de mangle piñuelo hasta el vivero. Una vez rellenas las camas germinativas con fango se procedió a la siembra de las 20 625 semillas. Las semillas se mojaban con las mareas altas propiciando las condiciones ambientales naturales para su crecimiento. En un periodo de 35 días desarrollaron 4 hojas y su sistema radicular.

La limpieza del sustrato con presencia del helecho *Acrostichum aureum* se ejecutó con machete, cortando una hectárea por día. Las hojas del helecho, una vez cortadas, se dejaron en el suelo para que su descomposición sirviera como materia orgánica. Los arbolitos producto de la regeneración natural, rezagados en su crecimiento, fueron mantenidos en el área para que pudieran crecer sin la competencia del helecho. Durante el primer año y hasta el cuarto año se realizaron 4 limpiezas, cada cuatro meses, y durante el quinto año, solo dos limpiezas semestrales.

En el polígono seleccionado de las 33 hectáreas en el bosque inundable de manglar se realizó, en el 2013, la siembra en tres fases:

I fase: del 30 julio al 7 de agosto 2013 se sembraron 7 500 plántones para reforestar 12 ha;

II fase: del 7 al 12 de noviembre se reforestaron 6 875 plántones en 11 hectáreas;

III fase: del 12 al 17 de diciembre se sembraron 6 250 plántones en 10 hectáreas.

La reforestación se realizó sembrando 625 plántones de *Pelliciera* en cada hectárea. La siembra de los plántones se realizó en forma dispersa. Esta técnica de siembra se aplicó para no crear competencias de espacio, luz, nutrientes y agua con la regeneración natural de las otras especies existentes de árboles y arbustos en el ecosistema.

En el 2014 se establecieron 18 parcelas distribuidas al azar en todo el polígono de las 33 hectáreas que permitieron evaluar el crecimiento de los plántones. Para cada parcela se georreferenciaron sus coordenadas

con un GPS; después, se ubicó su posición geográfica dentro del mapa del polígono de las 33 hectáreas. En cada parcela se seleccionaron 50 arbolitos de *mangle piñuelo* a los cuales se les practicaron mediciones de altura, formación de número de ramas principales, estimándose la mortalidad. Se realizaron seis mediciones, dos por año, una durante la estación lluviosa y otra durante la estación seca, desde el 2014 hasta el 2017.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La proliferación del *Acrostichum aureum*, debido a la deforestación, ha sido uno de los factores que impide el crecimiento de todas las especies de árboles que habitan los ecosistemas de manglar a través de la regeneración natural. Este helecho oportunista, que se desarrolla después de la tala del manglar, crece bien en suelos salobres; desarrolla rizomas, y, en su base, varias hojas hasta alcanzar cuatro metros de largo. La densidad de una planta a otra es casi de unos 0,50 centímetros y la cobertura del bosque de 1 800 hectáreas tiene un 70 % invadida por este helecho.

Alturas promedio de los árboles de *Pelliciera rhizophorae*.

Las mediciones realizadas en 900 árboles de dieciocho parcelas, de un total de 20 625 plántones, representaron el 4,36 % de los árboles reforestados. Se realizaron seis mediciones desde 2014 al 2017. En la figura 1 se presenta la altura promedio en las dieciocho parcelas durante las seis mediciones y otros datos resultantes durante estas mediciones.

A través del cálculo de la desviación estándar se pudo verificar la dispersión de la altura de los árboles. Desde la primera medición hasta la tercera se puede observar una desviación en las mayores alturas de 0,60 cm a 0,90 cm; en los árboles de menor altura, los resultados van desde 0,40 cm hasta 0,50 cm durante los primeros 602 días. En la cuarta medición, los árboles de *Pelliciera* alcanzaron alturas promedio de 114,3 cm. Algunos árboles lograron alcanzar alturas mayores, de hasta 140 cm, transcurridos unos 806 días. En la quinta medición, los árboles de *Pelliciera* siguieron mostrando un mayor crecimiento hasta alcanzar una altura promedio de 135,8 cm, durante unos 996 días transcurridos. En esta medición se pudo observar alturas mayores, hasta 150 cm. El mayor incremento en altura (205,1 cm) se observó en la sexta medición.

Los árboles de mayor altura llegaron a medir 245,5 cm, y los de menor rango de altura, alrededor de 190,0 cm.

Desde la primera medición hasta la sexta se pudo apreciar que los arbolitos de *Pelliciera* crecieron de forma lineal en el tiempo. Esto corrobora que el área de bosque inundable o zona estuarina es apropiada para su desarrollo.

La figura 2 presenta los datos de la media y la desviación típica de las medidas de longitud de las alturas según los distintos muestreos, y la línea de tendencia de la curva, como una función polinomial de orden 6 (con un R2 de 1).

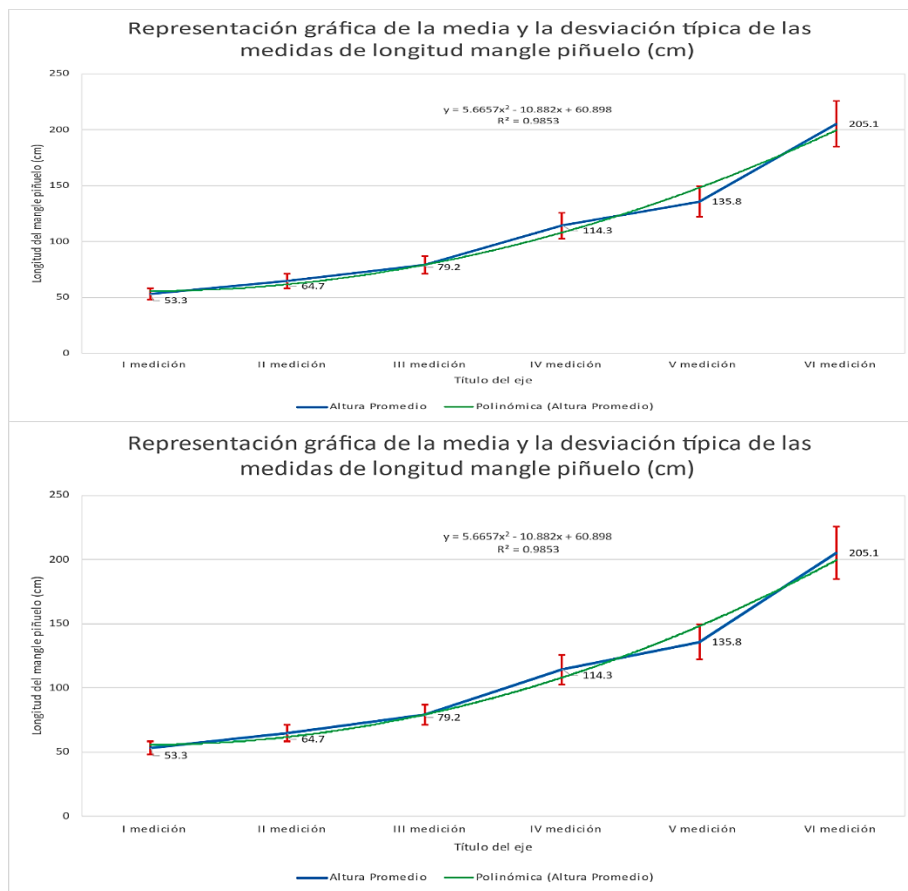


Fig. 2 Representación gráfica de la medida y la desviación de longitud del mangle piñuelo (cm)

La figura 3 permite observar los valores de árboles muertos por grupo de parcelas. Cada valor en un grupo de parcelas es una columna apilada de acuerdo con cada etapa de medición. El mayor número de árboles de mangle muertos se dio en las parcelas 3, 4 y 11.

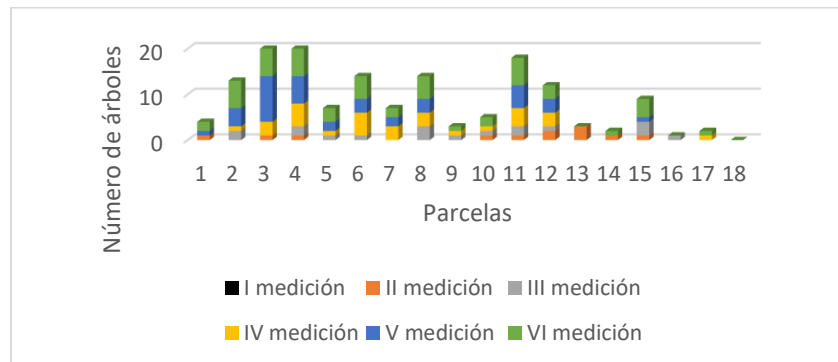


Fig. 3 Número de árboles de mangle muerto por etapa de medición

El porcentaje de la variación de la altura promedio de los árboles con respecto a la variación del número de ramas está representado en la figura 4. La correlación es positiva y muy fuerte entre las dos variables en estudio, con un R2 de 92 %. De igual forma, la dispersión más fuerte se puede observar con un máximo de quince ramas y una altura de alrededor de 200 cm.

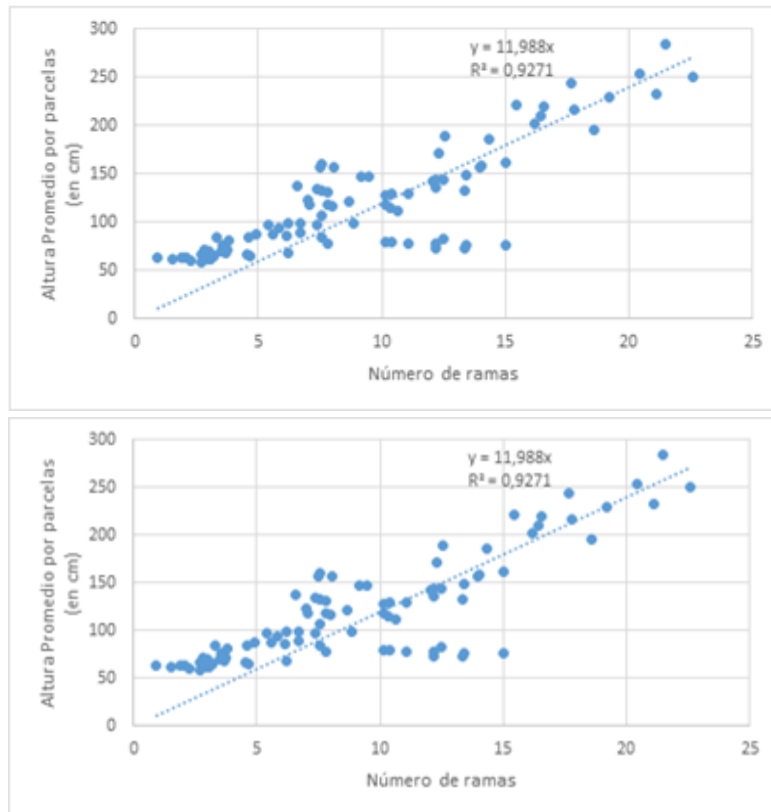


Fig. 4 Correlación entre la altura promedio de árboles por parcelas vs número de ramas.

Se obtuvieron alturas promedio de las seis mediciones finales en las dieciocho parcelas. Las plantas crecieron 11,33 cm en 195 días, de la primera a la segunda medición; de la segunda a la tercera medición, las plantas crecieron un promedio de altura de 14,58 cm en 160 días. De la tercera a la cuarta medición, las plantas crecieron, en promedio de altura, 35,07 cm en 204 días, mientras que, de la cuarta a la quinta medición, las plantas crecieron, en promedio de altura, 21,52 cm en 190 días. Finalmente, de la quinta a la sexta medición, las plantas crecieron, en promedio de altura, 69,23 cm en 475 días (figura 5).

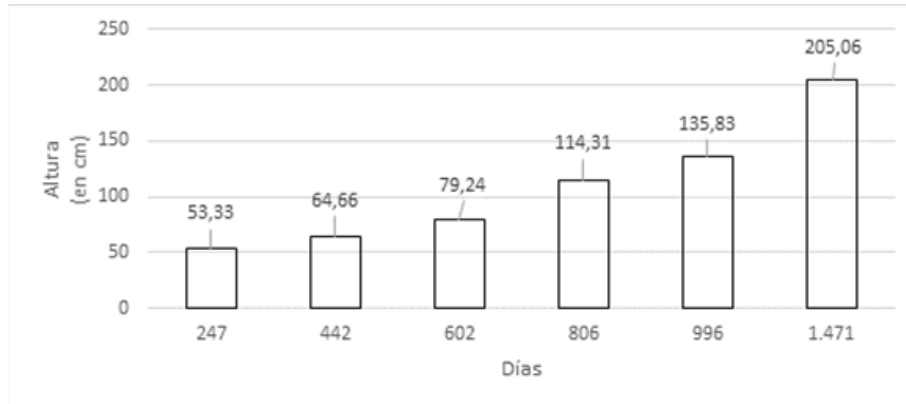


Fig. 5 Altura promedio de dieciocho parcelas de árboles de mangle

La formación de ramas principales fue otra medición registrada durante el crecimiento del mangle piñuelo. En la segunda medición, realizada en 442 días, se obtuvo un promedio de 2,92 ramas principales, y durante la tercera medición, en 602 días, se obtuvo un promedio de 9 ramas. En la cuarta medición, a los 806 días, se obtuvo un promedio de 7,27 ramas, mientras que, en la quinta medición, a los 996 días, se obtuvo un promedio de 11,02 ramas. Finalmente, en la sexta medición, transcurridos 1 471 días, el promedio de ramas fue de 15,08. Se pudo observar que el crecimiento fue proporcional a la formación de ramas a través del tiempo (figura 6).

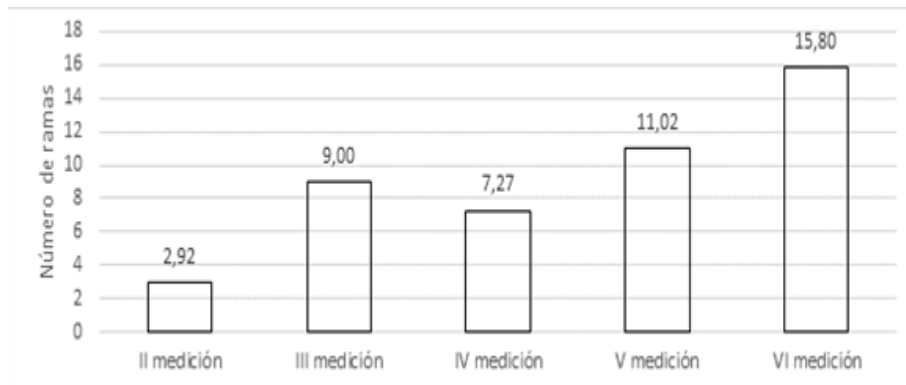


Fig. 6 Número de ramas de árboles de mangle por período de medición

CONCLUSIONES

Las condiciones naturales para producir los plántones en el vivero fue una técnica apropiada para obtener buenos resultados de sobrevivencia en el polígono de las 33 hectáreas. El uso del sustrato o lodo procedente del área en donde crecen los rodales de piñuelo y el agua salobre procedente de un estero, donde la hidrología del agua era similar sobre la base de las fluctuaciones de las mareas contribuyeron a la sobrevivencia de los plántones. En el vivero no hubo mortalidad y las plantas salieron con 4 a 6 hojas de su sistema radicular.

El control, a través de la corta del helecho, jugó un papel importante debido a que se le dio mayor entrada de luz a las otras especies, producto de la regeneración natural, para su crecimiento y desarrollo. Este control se mantuvo durante los cinco años del proyecto y se pudo observar que, durante el tercer año, el helecho fue perdiendo fuerza en el desarrollo de sus hojas y en su crecimiento.

Esta restauración se realizó en el hábitat donde crece el mangle piñuelo con condiciones ambientales y de salinidad semejantes. Solo se controló la especie invasora (helecho), y se utilizó el método de siembra dispersa al azar. Un total de 625 plántones fueron sembrados por hectárea, brindándole espacio a los árboles padres para que durante la diseminación de sus semillas estas no encontrarán competencia con los plántones reforestados. Se obtuvo una altura promedio de 205,06 centímetros y la formación de 15 ramas promedio durante los cuatro años de medición.

El éxito o fracaso de esta restauración está relacionada positivamente con el interés de las comunidades en apropiarse del proyecto y participar a lo largo del tiempo que dure éste.

AGRADECIMIENTO

De manera destacada mi aprecio y reconocimiento a los señores Víctor Díaz (Yako) y Manuel Díaz, pescadores y vecinos de la comunidad de Pedregal, quienes participaron de todas las actividades de reforestación y se involucraron en cada una de las mediciones de las parcelas del bosque de manglar en Pedregal, Chiriquí. A la Licenciada Yaniza

Axpria (bióloga de la empresa Santa María), a la MSc. Yolani Robles por la revisión del documento. Al Dr. Carlos González quien realizó el análisis estadístico de los datos y la confección de los gráficos.

REFERENCIAS

Caldern-Saenz, E. (1984) 'Occurrence of the mangrove, *Pelliciera Rhizophorae*, on the caribbean coast of Colombia with biogeographical notes.', 35(1), pp. 105–110. Available at: <https://www.ingentaconnect.com/content/umrsmas/bullmar/1984/00000035/00000001/art00012?crawler=true>.

Duke, N. C., Pinzón M., Z. S. and Prada T, M. C. (1997) 'Large-scale damage to mangrove forests following two large oil spills in Panama', *Biotropica*, 29(1), pp. 2–14. doi: 10.1111/j.1744-7429.1997.tb00001.x.
Ellison, A., Farnsworth, E. and Moore, G. (2010) '*Pelliciera rhizophorae*', *The IUCN Red List of Threatened Species 2010*, 8235.

Fuchs, H. P. (1970) 'Ecological and Palynological Notes on *Pelliciera Rhizophorae*', *Acta Botanica Neerlandica*, 19(6), pp. 884–894. doi: 10.1111/j.1438-8677.1970.tb00192.x.

Jimenez, J. A. (1984) 'A Hypothesis to Explain the Reduced Distribution of the Mangrove *Pelliciera rhizophorae* Tr. & Pl.', *Biotropica*, 16(4), p. 304. doi: 10.2307/2387939.

Medina, E. *et al.* (2014) 'Soil Salinity , Sun Exposure , and Growth of *Acrostichum aureum* , the Mangrove Fern Author (s): Ernesto Medina, Elvira Cuevas , Marianne Popp and Ariel E . Lugo Stable URL : <http://www.jstor.org/stable/2995279> . *Rhizophora mu-*', 151(1), pp. 41–49. Available at: <https://www.jstor.org/stable/2995279>.

Roth, L. and Grijalva, A. (2016) 'NEW RECORD OF THE MANGROVE PELLICIERA RHIZOPHORAE (THEACEAE) ON THE CARIBBEAN COAST OF NICARAGUA Author (s): Linda C .

Roth and Alfredo Grijalva Published by : New England Botanical Club , Inc . Stable URL : <http://www.jstor.org/stable/23312792> REFERE', 93(874), pp. 183–186. Available at: <https://www.jstor.org/stable/23312792>.

Tovar, D. (2008) ‘Propuesta Para El Establecimiento De La Nueva Area Protegida De Los Manglares Del Golfo De Chiriquí (Distritos De Alanje , David Y San Lorenzo)’, p. 168.

Trejos, C. *et al.* (2007) ‘Manejo y su Relación con la Pesquería en Panamá : Análisis de la relación existente entre las poblaciones de fauna marina de importancia económica con las del bosque de manglar , en la República de Panamá .’, *CATHALAC (Centro del agua del Trópico Húmedo para América Latina y el Caribe)*, p. 84. Available at: [https://aquadocs.org/bitstream/handle/1834/7986/Analisis de la relacion existente entre las pesquerias y los manglares-panama.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://aquadocs.org/bitstream/handle/1834/7986/Analisis_de_la_relacion_existente_entre_las_pesquerias_y_los_manglares-panama.pdf?sequence=1&isAllowed=y).


Twilley, R. and Rivera-Monroy, V. (2014) ‘Developing Performance Measures of Mangrove Wetlands Using Simulation Models of Hydrology , Nutrient Biogeochemistry , and Community Dynamics Author (s): Robert R . Twilley and Victor H . Rivera-Monroy Source : Journal of Coastal Research , , SPECIAL IS’, (40). Available at: <https://www.jstor.org/stable/25736617>.


Winograd, M. (1983) ‘Observaciones Sobre el Hallazgo de *Pelliciera rhizophorae* (Theaceae) en el Caribe Colombiano’, *Biotropica*, 15(4), p. 297. doi: 10.2307/2387657.



MULTIPARASITISMO EN LARVAS DE *Hypercompe muzina* (LEPIDOPTERA: EREBIDAE)

Alonso Santos-Murgas¹ y Saúl S. González Guillén²

¹Universidad de Panamá, Museo de Invertebrados G. B. Fairchild, Facultad de Ciencias Naturales Exactas y Tecnología, Departamento de Zoología, Panamá. santosmurgasa@gmail.com 

²Universidad de Panamá, estudiante de la Escuela de Biología, Facultad de Ciencias Naturales Exactas y Tecnología, Panamá. samitsaulgonz19@gmail.com 

Fecha de recepción: 7 de junio de 2022

Fecha de aceptación: 26 de octubre de 2022

RESUMEN

El comportamiento y hábitos de los insectos es ampliamente afectado por sus interacciones con parasitoides y sus depredadores. Se estima que gran parte de todas las especies interactúan en alguna parte de su ciclo de vida con complejas dinámicas planta/insecto/parasitoide. Los grupos parasitoides tratados en este artículo son las moscas tachinidas y las avispas braconidas. Las avispas parasitoides del género *Cotesia* son buenos modelos para el estudio de los parasitoides. Las moscas tachinidas representan aproximadamente el 20% de todas las especies de parasitoides. Se reporta para Panamá el multiparasitismo sobre una larva de *Hypercompe muzina* (Lepidoptera, Erebidae) por *Cotesia congregata* y moscas parasitoides de la Familia Tachinidae, esta interacción fue observada en bosques de Villas de Arraijan, Juan Demóstenes Arosemena, Arraijan, Prov. Panamá Oeste y en vegetación del campus central de la Universidad de Panamá. Se reportan once (11) especies vegetales como plantas hospederas de las larvas de *H. muzina*. Se aporta información biológica y ecológica de los parasitoides y su hospedero para Panamá y la región.

PALABRAS CLAVES

Control biológico, *Cotesia congregata*, Parasitoides, Tachinidae

MULTIPARASISM IN LARVAE OF *HYPERCOMPE MUZINA* (LEPIDOPTERA: EREBIDAE)

ABSTRACT

The behavior and habits of the insect are largely affected by their interactions with parasitoids and their predators. It is estimated that a large part of all species interacts at some part of their life cycle with complex plant / insect / parasitoid dynamics. The parasitoid groups discussed in this article are tachinid flies and braconid wasps. The parasitoid wasps of the genus *Cotesia* are good models for the study of parasitoids. Tachinid flies represent approximately 20% of all parasitoid species. Multiparasitism is reported for Panama of a *Hypercompe muzina* larvae (Lepidoptera, Erebidae) by *Cotesia congregata* and parasitoid wasps of the Braconidae Family is reported for Panama, this interaction was observed in forests of Villas de Arraijan, Juan Demostenes Arosemena, Arraijan, Prov. Panama West and in vegetation of the central campus of the University of Panama. Eleven (11) plant species are reported as host plants for *H. muzina* larvae. Biological and ecological information on parasitoids and their host is provided for Panama and the region.

KEYWORDS

Biological control, *Cotesia congregata*, Parasitoid, Tachinidae

INTRODUCCION

En los trópicos existen una gran cantidad de moscas y avispas parasitoides que atacan principalmente a estadios inmaduros y en algunos casos exclusivamente a los estadios larvas de lepidópteros (Smith *et al.* 2008). Estos grupos parasitoides intervienen directamente en la dinámica poblacional de los insectos, causando la muerte de sus hospederos (Smith *et al.* 2008).

Las larvas de *Hypercompe muzina* presentan hábitos alimentarios variados, es decir son polífagas. Existen muy pocas especies de larvas del orden Lepidoptera que tienen un amplio rango de plantas hospederas que utilizan para alimentarse, o por lo menos hay muy pocas

publicaciones al respecto (García-Barros, et al. 2015). Las larvas de Lepidoptera raramente son polífagas; todo lo contrario, las larvas de lepidóptera suelen depender estrictamente, y causar daños, en plantas específicas (García-Barros, et al. 2015).

Como parasitoides de las larvas de Lepidoptera, se encuentran las moscas tachinidas y los himenópteros braconidos, son grupos de gran importancia debido a sus hábitos parasitoides (Dindo & Nakamura 2018). Los tachinidos ocupan estrategias parasíticas muy especializadas, directas e indirectas, existen métodos directos, que son los más comunes dentro del grupo, en donde los huevos son puestos sobre el tegumento del hospedero (Dindo & Nakamura 2018).

La Familia Tachinidae presenta una gran diversidad de especies, esta es una de las familias de parasitoides más diversas del mundo (O'Hara, 2013; Von Ellenrieder *et al.* 2014). Son insectos de gran importancia ecológica debido a que forman una parte importante de las comunidades de insectos, y parasitan a larvas de insectos holometábolos (Stireman *et al.* 2018). Algunas de las familias que son parasitadas por Tachinidae son Melolonthidae (Coleoptera) (Ramírez-Salinas et al, 2006); Curculionidae (Coleoptera) (Soto & Ocampo 2011); Riodinidae (Lepidoptera) (Santos-Murgas & Jaén 2020); entre otros.

La Familia Braconidae es de gran importancia a nivel mundial por actuar como controladores biológicos naturales, Distribuyéndose desde zonas templadas hasta tropicales siendo más comunes e influyentes en estas zonas (Sanchez *et al.* 1998; Coronado & Saldivar 2014). Los braconidos pueden ser exo o endo parasitoides de larvas de Diptera, Coleoptera y Lepidoptera (Whitfield, 2002).

Las avispas parasitoides de la familia Braconidae, inyectan veneno a sus hospedadores para paralizarlos totalmente (idiobioentes) y depositan sus huevos dentro o sobre el hospedador (Whitfield, 2002). *Cotesia congregata* (Say, 1836) ha sido reportada como parasitoide de larvas de *Acronicta sp.* (Noctuidae), *Oryba kadeni* (Sphingidae) y *Halysidota tessellaris* (Añino *et al.* 2017; Abrego & Santos 2019).

Este artículo tiene como objetivo reportar el multiparasitismo sobre larvas de *Hypercompe muzina* (Lepidoptera: Erebidae) en condiciones naturales.

MATERIALES Y METODOS

Se realizaron observaciones biológicas en dos puntos de la República de Panamá. Provincia de Panamá Oeste, Juan Demóstenes Arosemena, Villas de Arraiján, Park Village. Se realizaron colectadas y observaciones sobre las plantas: *Acalypha wilkesiana* M.; *Brassavola nodosa* (L.); *Philodendron pertusum* (Engl.); *Bougainvillea berberidifolia* H. y en *Turnera ulmifolia* L.; 30 septiembre 2020, col. Santos M. A. en las coordenadas, latitud 8° 56' 19.25 N, longitud 79° 44' 5. 85 O (Fig. 1-A). El otro sitio de estudio corresponde a la Universidad de Panamá, Campus Central. Se colectó y observó sobre las plantas de *Ixora coccinea* L.; “frijol chiricano” *Vigna unguiculata* (L) y *Bougainvillea berberidifolia* H. 10 de junio 2021. Col. Santos M. A. en las coordenadas, latitud 8° 59'15.1 N, longitud 79° 32'02.6 O (Fig. 1-B).

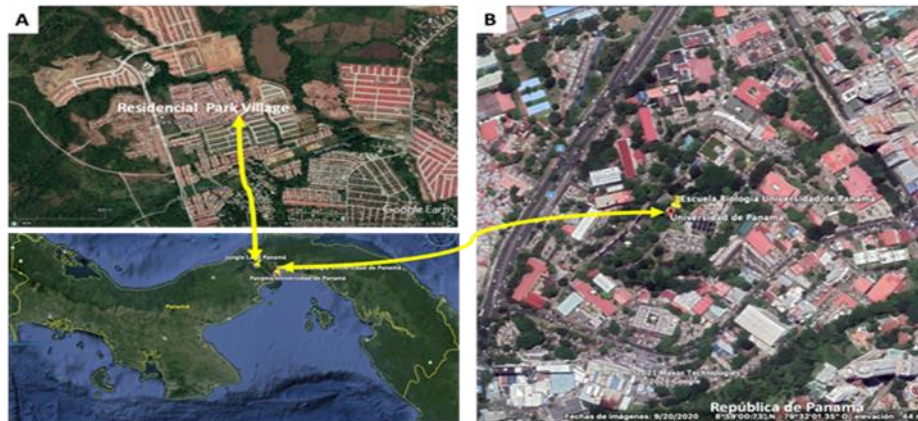


Fig. 1. Área de estudio. A. Las Villas de Arraiján Residencial Park Village. B. Escuela de Biología, Campus Central de la Universidad de Panamá.

Las larvas de ambos sitios fueron transportadas en jaulas de mallas y colocadas en el laboratorio, a temperatura ambiente y con suficientes hojas de las plantas del sitio. Al observar que ya no se alimentaban fueron colocadas en plato Petri de plástico para evitar que se escaparan los parasitoides al salir de sus hospederos.

Los especímenes una vez eclosionados fueron montados en alfileres y etiquetados. Las avispas parasitoides Braconidae, fueron identificadas con ayuda de clave taxonómicas, Identification keys to the economically important species of parasitic wasps of the genus *Cotesia* (Hymenoptera: Braconidae). Lexington: Hymenoptera Institute, Universidad de Kentucky. URL disponible en: <http://www.sharkeylab.org/cotesia/cotesia.cgi>.

Para la identificación de las moscas de la familia Tachinidae se utilizó la información de, O'Hara (2011). World genera of the Tachinidae (Diptera) and their regional occurrence. Para corroborar la identificación de la polilla *Hypercompe muzina* se utilizó la colección en línea de imágenes del Museo de Historia Natural de Londres. Consulta 17 agosto 2019. <https://www.nic.funet.fi/pub/sci/bio/life/insecta/lepidoptera/ditrysia/noctuoidea/arctiidae/arctiinae/hypercompe/#muzina>.

Todos los especímenes fueron depositados en la colección Nacional de Referencia del Museo de Invertebrados G. B. Fairchild, de la Universidad de Panamá.

RESULTADOS

Entre los dos sitios de estudio, se colectó 12 larvas de *Hypercompe muzina* (Oberthür, 1881). Se obtuvieron 280 adultos del parasitoide gregario *Cotesia congregata* (Say, 1836) (Hymenoptera: Braconidae), de tres larvas de su último estadio; después de siete días de la colecta, que procedían del Campus Central de la Universidad de Panamá, (Fig. 2 A-B).

De una larva de *H. muzina* colectada en campus central de la Universidad de Panamá, se obtuvieron dos parasitoides *C. congregata* (280 individuos) y dos moscas de la familia Tachinidae. Las moscas puparon en el interior de la carcasa de la larva hospedera; dos horas de haber eclosionado las moscas se aparearon, lo que nos indica que se obtuvo la hembra y el macho de estas moscas (Fig. 2 C-D).

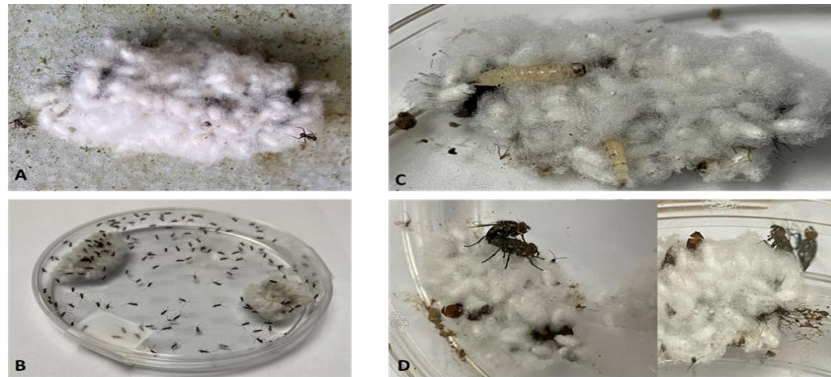


Fig. 2. Proceso de parasitismo de *H. muzina*. A. Larva de *H. muzina* parasitada, cubierta por las pupas de *Cotesia congregata*. B. Eclosión de las pupas de *C. congregata*. C. Larvas de moscas Tachinidae en el dorso de la larva de *H. muzina* y pupas de *C. congregata*. D. Adultos hembra y macho de moscas Tachinidos en copula sobre larva *H. muzina* y pupas de *C. congregata*.

Se obtuvieron varios adultos de la polilla *H. muzina* (Fig. 3 C, D). Los adultos de esta especie presentan una coloración blanca y el abdomen en la parte dorsal con una coloración casi completamente naranja.



Fig. 3. A. Vista dorsal-lateral de Larva de *H. muzina*, posada sobre raquis de *Philodendron pertusum*. B. Vista dorsal de Larva de *H. muzina*, herborizando la flor de *Brassavola nodosa*. C. Vista dorsal del adulto de *H. muzina* recién eclosionada de la pupa. D. Adulto de *H. muzina* con una gota de sustancia defensiva en la parte dorsal del tórax.

En el Cuadro N°. 1 se enuncian las once especies de plantas hospederas que utilizó *H. muzina*, lo que indica y comprueba la conducta alimenticia generalizadas de los estadios larvales sobre sus plantas hospederas.

Cuadro N°. 1. *Especies de plantas hospederas de los estadios larvas de Hypercompe muzina.*

Especies de plantas	Familias de plantas	Estructuras de las plantas herborizada	Ubicación de las plantas
<i>Turnera ulmifolia</i> L.	Turneraceae	Hojas	Jardines
<i>Acalypha wilkesiana</i> M.	Euphorbiaceae	Hojas	Jardines
<i>Philodendron pertusum</i> (E.)	Araceae	Hojas y tallo	Jardines
<i>Ixora coccinea</i> L.	Rubeaceae	Hojas	Jardines
<i>Brassavola nodosa</i>	Orchidaceae	Flores	Jardines y cultivos
<i>Thunbergia grandiflora</i>	Acanthaceae	Hojas y flores	Jardines
<i>Bougainvillea berberidifolia</i> H.	Nyctaginaceae	Hojas	Jardines
<i>Vigna unguiculata</i> (L.)	Fabaceae	Hojas	Cultivos
<i>Handroanthus chrysanthus</i>	Bignoniaceae	Hojas	Áreas abiertas
<i>Cordyline fruticosa</i>	Asparagaceae	Hojas	Jardines
<i>Cissus verticillata</i> (L.)	Vitaceae	Hojas	Área abierta

DISCUSIÓN

El género *Hypercompe* Hübner (Lepidoptera, Erebidae, Arctiinae, Arctiini), es un género de más de 80 especies distribuidas por toda Américas (Vincent & Laguerre, 2014). Al menos algunas especies de sus larvas son polífagas y se registran regularmente alimentándose de plantas de importancia económica, pero normalmente no son plagas de importancia (Cock, et al. 2014).

Existen varios estudios que describen a *C. congregata* como un parasitoide con alto potencial de controlador biológico; Kester *et al.* 1991; Ross & Dunn 1989; Amaya *et al.*, 2005; Adamo, *et al.* 2016; Añino, *et al.* 2017; Abrego & Santos, 2019. También, existen varias publicaciones que indican que *C. congregata*, en la región Neotropical posee un amplio espectro de hospederos; es decir, que es una especie no específica; además, presenta una amplia distribución geográfica

(Krombein, 1979) y altitudinal (desde el nivel mar hasta los 2 000 m.s.n.m.).

Los insectos que son parasitados por múltiples especies, se pueden dar cierta competencia entre ellos y algunas veces sólo una especie sobrevive; es por esta razón que en muy pocas ocasiones se reporta multiparasitismo Fisher (1961) (Fig. 2 A, B, C, D).

Según Schroeder (1974) indica que el multiparasitismo entre parasitoides de distintas especies, es un fenómeno común, debido a que la mayoría de los parasitoides asociados a una especie (hospedero) atacan a estadios larvarios distintos. Consideramos que los parasitoides koinobiontes: insectos que son hospederos y están parasitados, tienen la facultad de sobrevivir y continuar su desarrollo una vez el parasito llegue a adulto y salga del hospedero, como por ejemplo las larvas de *C. congregata*, atacan primero a sus hospederos y permanecen en la parte tegumentaria; alimentándose del tejido grasos, sin causar daño a órganos internos.

Los idiobiontes, como por ejemplo algunas especies de la familia Tachinidae, llegan a sus hospederos en sus últimos estadios larvario y lo consumen en su totalidad desde el interior.

CONCLUSION

La polilla *Hypercompe muzina* tiene dos enemigos naturales, la avispa parasitoide gregaria koinobionte *Cotesia congregata* y moscas de la familia Tachinidae; ambos parasitoides pueden burlar las defensas estructurales de las larvas, como son las fuertes espinas y la abundante pilosidad que cubre todo su cuerpo. También, evidenciamos el carácter alimenticio polífago de las larvas de *H. muzina*, que consumen el follaje y las diferentes estructuras de una gran variedad de especies de plantas.

REFERENCIAS

Abrego, L. J., Santos-Murgas, A. (2019). Ocurrencia de multiparasitismo sobre la larva de *Halysidota tessellaris* (Lepidoptera: Erebidae) en Panamá. *Tecnociencia*, 21 (2), 5-11.

Adamo, S., Kovalko, I., Turnbull, K., Easy, R., Miles, C. (2016). The parasitic wasp *Cotesia congregata* uses multiple mechanisms to control host (*Manduca sexta*) behavior. *Journal of Experimental Biology*, 219, 3750-3758.

Amaya, K; Agari, S., Jung, R., Hongskula, M., Beckage, N. (2005).

Parasitization of *Manduca sexta* larvae by the parasitoid wasp *Cotesia congregata* induces an impaired host immune response. *Journal of Insect Physiology*, 51 (5), 505-512.

Añino, Y., Santos-Murgas, A., Padilla, A. (2017). Parasitismo gregarario de *Cotesia congregata* (Say, 1836) (Hymenoptera: Braconidae) en dos nuevos hospederos. *Revista Biodiversidad Neotropical*, 7 (1), 48–51.

Cock, M.J.W., Polar, P., Rutherford, M.G., Cafá G., Buddie, A.G. (2019). *Hypercompe trinitatis* (Lepidoptera, Erebidae, Arctiinae) and its Caterpillar in Trinidad, W.I. Living World. *Journal Trinidad and Tobago Field Naturalists' Club*, 20-27.

United States Department of Agriculture, Research, Education, Economics Information System (USDA) (REEIS). (2002).

Identification keys to the economically important species of parasitic wasps of the genus *Cotesia* (Hymenoptera: Braconidae). Lexington: Hymenoptera Institute, Universidad de Kentucky. URL disponible en: <http://www.sharkeylab.org/cotesia/cotesia.cgi>

Coronado-Blanco, J., Zaldívar-Riverón, A. (2014). Biodiversidad de Braconidae (Hymenoptera: Ichneumonoidea) en México. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 85, 372-378.

- Dindo, M., Nakamura, S. (2018). Oviposition Strategies of Tachinid Parasitoids: Two Exorista Species as Case Studies. *International Journal of Insect Science*, 10, 1–6.
- Fisher, R. C. (1961). A study in insect multiparasitism. 1. Host selection and oviposition. *Journal Experimental Biology*, 38, 267–275.
- García-Barros, E.; Helena Romo; Sarto i Monteys, V.; Munguira L. M.; Baixeras, J.; Vives Moreno, A., Yela García, J. L. (2015). Clase Insecta. Orden Lepidoptera. Revista Ibero Diversidad, Revista IDE@ - SEA, N°. 65: 1–21. www.sea.entomologia.org/IDA@
- Kester, K. M., Barbossa, P. (1991). Postemergence learning in the insect parasitoid, *Cotesia congregata* (Say) (Hymenoptera: Braconidae), *Journal of Insect Behavior*, 4 (6), 727–742.
- Krombein, K.V. (1979). *Catálogo de himenópteros en América al norte de México*. Prensa de la Institución Smithsonian, Washington DC, Estados Unidos.
- O’Hara J. E. (2011). World genera of the Tachinidae (Diptera) and their regional occurrence. Versión 6.0. http://www.nadsdiptera.org/Tach/Genera/Gentach_ver6.pdf
- O’Hara, J. E. (2013). History of tachinid classification (Diptera, Tachinidae). *ZooKeys*, 316, 1–34.
- Pitkin, Brian; Jenkins, Pablo. "Familia: Arctiidae". Museo de Historia Natural, Londres. (2029). <https://www.nic.funet.fi/pub/sci/bio/life/insecta/lepidoptera/ditrysia/noctuoidea/arctiidae/arctiinae/hypercompe/#muzina>
- Ramírez-Salinas, C., Pacheco-Flores, C., Castro-Ramírez, A. (2006). *Cryptomeigenia* sp. (Diptera: Tachinidae) como parasitoide de adultos de *Phyllophaga* (Phytalus) Rufotestacea M., (1918) (Coleoptera: Melolonthidae) en Chiapas, México *Acta Zoológica Mexicana* (n.s.). 22(1), 1-8
- Ross, D., Dunn, P. (1989). Effect of parasitism by *Cotesia congregata* on the susceptibility of *Manduca sexta* larvae to bacterial infection, *Developmental & Comparative Immunology*, 13 (3), 205- 216.

Schroeder, D. (1974). A study of the interactions between the internal larval parasites of *Rhyacionia buoliana* (Lepidoptera: Olethreutidae). *Entomophaga*, Vol.19 (2): 145–171.

Soto, A., A. Ocampo. (2011). Estudio preliminar de *Trigonospila* sp. (Diptera:Tachinidae), parasitoide de *Compsus Viridilineatus* (Coleoptera: Curculionidae). *Boletín Científico. Centro de Museos. Museo de Historia Natural*, 15 (1), 150 – 159.

Smith, A., Rodriguez, J., Whitfield, J., Deans, A., Janzen, D., Hallwachs, W., Hebert, P. (2008). Extreme diversity of tropical parasitoid wasps exposed by iterative integration of natural history, DNA barcoding, morphology, and collections. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 105 (34), 12359-12364.

Stireman, J., Cerreti, P., O’Hara, J., Blaschke, J., Moulton K. (2018). Molecular phylogeny and evolution of world Tachinidae (Diptera). *Molecular Phylogenetics and Evolution*, 139, 106358.

Vincent, B., Laguerre, M. (2014). Catalogue of the Neotropical Arctiini Leach, [1815] (except *Ctenuchina* Kirby, 1837 and *Euchromiina* Butler, 1876) (Insecta, Lepidoptera, Erebidae, Arctiinae). *Zoosystema*, 36, 137-533.

Von Ellenrieder N., Hauser M., Kinnee S., O’Hara, J. (2014). First record of a parasitoid tachinid fly (Diptera: Tachinidae) on a dragonfly (Odonata: Calopterygidae). *Studia dipterologica*, 21 (2): 335–341.


Whitfield, J. (2002). Estimating the age of the polydnavirus/braconid wasp symbiosis. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 99(11), 7508–7513.





Invited Review Article


SINGLE MOLECULE MAGNETS: TOWARDS TECHNOLOGICAL APPLICATIONS

Concepción Molina-Jirón¹, Lester Batista², Juan A. Jaén³, Wolfgang Wernsdorfer^{4,5} and Eufemio Moreno-Pineda^{3,6}

¹Universidad de Panamá, Facultad de Ciencias Naturales, Exactas y Tecnología, Departamento de Bioquímica, Panamá. concepcion.molina@up.ac.pa 

²Universidad de Panamá, Facultad de Ciencias Naturales, Exactas y Tecnología, Departamento de Física, Panamá. lester.batista@up.ac.pa 

³Universidad de Panamá, Facultad de Ciencias Naturales, Exactas y Tecnología, Departamento de Química-Física, Panamá. juan.jaen@up.ac.pa  eufemio.moreno@up.ac.pa 

⁴Institute for Quantum Materials and Technology (IQMT), Karlsruhe Institute of Technology (KIT), Hermann-von-Helmholtz-Platz 1, D-76344 Eggenstein-Leopoldshafen, Germany. wolfgang.wernsdorfer@kit.edu 

⁵Physikalisches Institut, Karlsruhe Institute of Technology, D-76131 Karlsruhe, Germany.

⁶Sistema Nacional de Investigadores (SNI), SENACYT, Panamá.

Fecha de recepción: 7 de octubre de 2022

Fecha de aceptación: 1 de noviembre de 2022

ABSTRACT

The utilisation of quantum properties can largely impact how technological devices work. Up to date, the acquired knowledge of the quantum nature of several systems inspired the proposal of several novel technologies such as quantum sensing, quantum simulation and quantum computing. Single Molecule Magnets (SMMs) represent a class of quantum objects with promising properties to be exploited in quantum technologies. As of today, SMMs have been shown to possess bewildering quantum effects such as Quantum Tunnelling of the Magnetisation (QTM), quantisation of the energy manifold, coherence, spin parity effects and entanglement, among others. Furthermore, they have been successfully integrated into hybrid single-molecule spintronic devices, such as spin transistors and spin valves, hence, propitiating

extensive investigation of technological applications. In this **Review Article**, some key quantum aspects, which make SMMs promising systems for technological proposals, are revised. Moreover, single-molecule devices, in which SMMs have been integrated in hybrid devices, as well as the technological applications such as quantum sensing, quantum simulation and quantum computing are described.

KEYWORDS

Quantum sensors, quantum simulations, quantum computation, spin transistor, spin valve, quantum bit, quantum error correction, quantum tunneling of magnetisation.

IMANES DE MOLÉCULA ÚNICA: HACIA APLICACIONES TECNOLÓGICAS

RESUMEN

La utilización de los efectos cuánticos puede influir en gran medida en el funcionamiento de los dispositivos tecnológicos. Hasta la fecha, los conocimientos adquiridos sobre la naturaleza cuántica de varios sistemas han impulsado la propuesta de varias aplicaciones tecnológicas futuristas, como sensores cuánticos, la simulación y la computación cuánticas. Los imanes de molécula única (SMM, por sus siglas en inglés) representan una clase de objetos cuánticos con propiedades prometedoras para ser explotados en las tecnologías cuánticas. Hoy en día, se ha demostrado que los SMMs poseen efectos cuánticos desconcertantes, como la tunelización cuántica de la magnetización (QTM, por sus siglas en inglés), la cuantización de los estados de energía, coherencia, efectos de paridad de espín y el entrelazamiento, entre otros. Además, se han integrado con éxito en dispositivos espintrónicos híbridos de una sola molécula, como los transistores y las válvulas de espín, lo que ha propiciado una amplia investigación de aplicaciones tecnológicas. En este artículo de revisión, se describen algunos aspectos cuánticos clave que hacen de los SMMs sistemas prometedores para propuestas tecnológicas. Además, se describen los dispositivos de una sola molécula, en los que los SMMs se han integrado como dispositivos híbridos, así como las aplicaciones tecnológicas, como sensores cuánticos, la simulación y la computación cuánticas.

PALABRAS CLAVES

Sensores cuánticos, simulaciones cuánticas, computación cuántica, transistor de espín, válvula de espín, bit cuántico, corrección cuántica de errores, tunelamiento cuántico de la magnetización.

INTRODUCTION

When considering the format in which funding agencies provide grants for scientific research, i.e., directed to tackle specific challenges with little or no room to explore adjacent problems, it is important to remember that many great scientific discoveries have been obtained by serendipity. In many cases, by accident, research designed to solve a scientific problem leads to a discovery in a somewhat different field (Bruce, O'hare, & Walton, 2010). The field of molecular magnetism is a clear example of serendipity. This field was discovered by chance when trying to understand the oxygen-evolving complex in Photosystem II (Christou, 1993). To describe the highest oxidation of state of this complex, in the early 1990s, a manganese complex with formula $[\text{Mn}_{12}(\mu_3\text{-O}_{12})(\text{CH}_3\text{COO})_{16}(\text{H}_2\text{O})_4]\cdot 2\text{CH}_3\text{COOH}\cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (or Mn_{12}) was studied with a range of techniques leading to the discovery of a large spin ground state, $S = 10$. Remarkably, the ground state of this complex was found to be highly anisotropic, leading to the observation for the first time of an energy barrier to the relaxation at the molecular level (Sessoli, 1993). Conversely to classical magnetism, in which the coupled magnetic moments (3D) give rise to a net magnetisation, the magnetic anisotropy in Mn_{12} arises from the individual units (0D). Molecules possessing such behaviour were coined SMMs, due to their single-molecule properties. This rather fortuitous discovery propitiated a great deal of interest in both chemists, trying to synthesise SMMs with enhanced properties, and physicists, fascinated by the wealth of properties exhibited by these systems. SMMs were expected to outclass conventional materials in data-storage abilities. To put it into context, if a conventional ninety-minute tape was made of Mn_{12} , the Mn_{12} tape would be able to store one hundred and fifty years of music. During the first ten years of the SMM field, the complexes were all based in polynuclear transition metal ions. In 2003 the renaissance of SMMs began when it was found that monometallic lanthanide-based complexes could also show an energy barrier to the relaxation, eluding the necessity of polynuclear systems (Ishikawa et al., 2003a). Ever since, SMMs have been shown to exhibit several quantum effects such as Quantisation (Ishikawa et al., 2003b; Sessoli et al., 1993), Quantum Tunnelling of the Magnetisation (QTM) (Chen et al., 2016; Ishikawa et al., 2005; Sangregorio et al., Ohm, Paulsen, 1997; Thomas et al., 1996), Quantum Coherence (Hill, 2003; Vincent et al., 2012), Berry Phase (Wernsdorfer

et al., 2002), Quantum Oscillations (Barco et al., 2000; Bertaina et al., 2008; Carretta et al., 2007; Yang et al., 2012) up to entanglement in ensembles (Candini et al., 2010; Garlatti et al., 2017; Lorusso et al., 2011; Troiani et al., 2013). These characteristics, along with the continuous miniaturisation of devices heading towards molecular levels and atomic levels, led to the proposal of SMMs in several technological applications such as high-density data storage, Quantum Sensing, Quantum Simulation, and ultimately Quantum Computing.

Technologically, we have witnessed the miniaturisation of devices, moving from extremely large computers like the ENIAC, down to powerful computers that can even fit on our pockets. Large interest has been devoted to zero-dimensional as well as 2D materials such as graphene (Novoselov et al., 2004) and graphene-like systems (Chen et al., 2017), due to their remarkable chemical, mechanical and physical properties (Xiang et al., 2015), boosting the investigation of their syntheses (Molina-Jirón et al., 2019; Zhang et al., 2013) and their implementation in spintronic devices (Bogani & Wernsdorfer, 2008; Novoselov et al., 2004; Sun & Rogers, 2007). However, a problem associated to the continuous miniaturisation of computers and its components is the quantum nature taking over at the molecular and atomic scale. The former, also known as Moore's law, acts as driving force for understanding and implementing quantum effects in technological applications. Towards this goal, the *first quantum revolution*, period in which researchers gained an understanding of quantum effects of physical systems, led to inventions such as the laser and transistors. As follow up step, in the *second quantum revolution* scientists attempt to employ the acquired quantum mechanical knowledge to engineering quantum systems and implement them in technological applications (Atzori & Sessoli, 2019; Dowling & Milburn, 2003). In this sense, the striking and unique characteristics of SMMs, have motivated intensive investigation of their properties for their integration in several technological applications. The quantum nature exhibited by SMMs could allow the long-sought control of quantum effects and their implementation of practical applications; a goal in the mind of scientists since the quantum mechanical description by Erwin Schrödinger (Schrödinger, 1926).

Numerous are the predicted advantages offered by the implementation of the quantum effects in technological applications. For example, small fluctuations of physical and biological systems could be sensed by exploiting the quantum coherence and entanglement of electronic states, surpassing classical sensing devices (Barry et al., 2016; Boss et al., 2017; Dovzhenko et al., 2018; Jenkins et al., 2019; Lawrie et al., 2019; Lee-Wong et al., 2020; Lovchinsky et al., 2016; Radu et al., 2020; Shi et al., 2015). Simulation of precise quantum mechanical problems, as suggested by Feynman (Feynman, 1982) and Lloyd (Lloyd, 1993) would be possible. Furthermore, arguably the most attractive implementation is the development of a quantum computer. A quantum computer would enable the realisation of particularly difficult and even unachievable tasks, such fast computation of extremely large problems, factorisation of large numbers, to the true universal simulation of large quantum mechanical problems. Remarkably, the possibility of developing a mature quantum computer attracted the attention of not just the scientific community, but also triggered the investment of several companies and consortiums resulting in a 16-qubit processor by the IBM Q-experience (García-Pérez et al., 2020), a 72-qubit quantum chip by Google (Kelly et al., 2015), a 19-qubits computer by Rigetti (Otterbach et al., 2017), a silicon spin-based 2-qubits processor by QuTech (Watson et al., 2018) and ultimately a NASA-Google partnership claiming quantum supremacy (Arute et al., 2019).

Currently, amongst the several systems explored for technological applications, SMMs are very attractive due to their quantum characteristics, tailored control over not just the structural aspects of the systems, but also the control over their electronic and nuclear characteristics. In this *Review Article*, some key aspects of SMMs for the integration in novel technological applications such as data storage devices, quantum simulators, quantum sensors and quantum computers will be discussed.

Manifestation of Quantum Effects in SMMs

The quantum characteristics observed in SMMs triggered several proposals in technological applications (Dowling & Milburn, 2003).

However, to integrate SMMs into such technologies, certain quantum characteristics must be gathered. This section describes a brief

description of certain key quantum characteristics of SMMs, which makes the candidates to be considered in these novel technologies.

Quantisation of the Energy manifold

The archetypal $[\text{Mn}_{12}(\mu_3\text{-O}_{12})(\text{CH}_3\text{COO})_{16}(\text{H}_2\text{O})_4]\cdot 2\text{CH}_3\text{COOH}\cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (or Mn_{12}) complex was the first system to show quantisation of the energy manifold (Sessoli et al., 1993). Below a certain temperature, the

magnetic ground state of Mn_{12} is $S = 10$, resulting from the strong interaction of the inner tetrahedron of Mn^{+4} and the external Mn^{+3} octagon. Although small in magnitude, the Spin-Orbit Coupling (SOC) is of paramount importance in transition metal SMMs since it induces anisotropy.

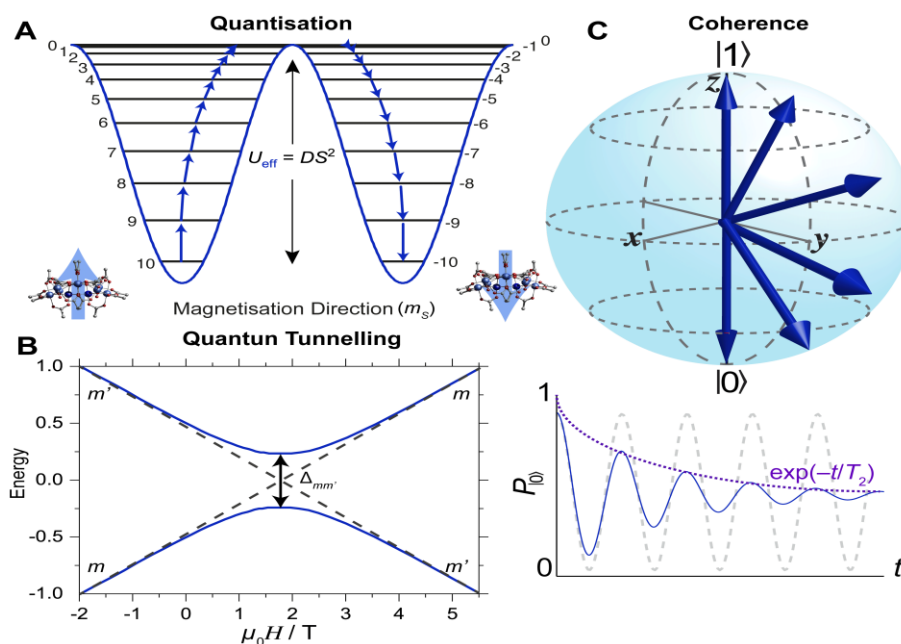


Figure 1. Quantum Effects in Single-Molecule Magnets: (A) Schematic representation of quantisation of the electronic energy level of Mn_{12} with $S = 10$ and $U_{\text{eff}} = DS^2$. The reversal of the magnetisation follows through the m_S states (blue arrows) via phonon absorption (excitation of the spin system to the top of the barrier) and emission (de-excitation to the bottom of the other side of the barrier). (B) Reversal can likewise occur via QTM through the barrier when the states are in resonance. (C) Schematic view of Qubit, highlighting the possible states generated by superposition. In a Qubit the coherence sufficiently long to allow the manipulation, operation and read-out before the information vanishes.

The SOC is defined by a spin Hamiltonian of the form: $\mathcal{H} = DS_z^2 + E(S_x^2 + S_y^2)$, with D being the zero-field splitting, and E the rhombic parameters. DS_z^2 defines the quantisation of the S states as $m_S = -S \dots S$ is doubly degenerated: $E(\pm m_S) = -|D|m_S^2$, hence, following a parabola with an energy barrier to the relaxation $U_{eff} = -|D|m_S^2$ (Fig. 1A). Each side corresponds to an opposed orientation of the magnetic moment in the parabola; hence D provides the barrier for the spin to flip its orientation. Due to the spin dependence of the energy barrier, a large spin multiplicity was aimed when synthesising transition metal SMMs.

The synthetic targets of the early development of the field were entirely based on transition metal ions. However, in 2003 a striking result was obtained when Ishikawa determined an energy barrier to the relaxation of single metallic-ion lanthanide-based SMMs (Ishikawa, et al., 2003a). The complex comprised a Tb^{3+} ion sandwiched between two phthalocyaninato (Pc) anionic ligands charged balanced by a tetrabutylammonium cation (TBA), namely $TBA[TbPc_2]$. Conversely to transition metal SMMs, where polynuclearity was required, the anisotropic property of the lanthanide-SMMs results from the strong intrinsic SOC due to the unquenched orbital momentum and large nuclear charge. The Russell-Saunders (RS) coupling scheme describes the electronic properties of 4f-SMMs ($J = |L - S| \leq J \leq L + S$), given that not S nor L are good quantum numbers. For $[TbPc_2]^-$ $S = 3$ and $L = 3$, henceforth, $J = L + S = 6$. Due to the large separation between the $J = 6$ and $J = 5$ (ca. 2900 K), solely the $J = 6$ multiplet is populated at standard conditions. For D_{4h} symmetry the Tb^{3+} ion sandwiched between the Pc ligands possesses a ligand field of the form (Ishikawa, Sugita, Okubo, et al., 2003b):

$$\mathcal{H}_{lf} = B_2^0 O_2^0 + B_4^0 O_4^0 + B_4^4 O_4^4 + B_6^0 O_6^0 + B_6^4 O_6^4 \quad (1)$$

being B_q^k experimental parameters. The degeneracy of the $2J+1$ states of the $J = 6$ multiplet is lifted by the ligand field leading to a $m_J = \pm 6$ ground doublet with a separation of ca. 600 K from the $m_J = \pm 5$ first excited state. As a result, the quantisation axis for the $m_J = \pm 6$ ground state is perpendicular to the Pc plane; this remains frozen under the threshold temperature, generated by the ligand field acting upon the Tb^{3+} .

Another surprising aspect of 4f-SMMs is their strong hyperfine coupling, of paramount significance for the observation of other quantum effects as well as their implementation in quantum computing applications (Godfrin et al., 2017). The strong interaction couples the electronic spin strongly to the nuclear spin $I = 3/2$ of Tb^{3+} via the hyperfine and the quadrupolar interaction. While the hyperfine interaction splits the $m_J = 6$ state in $2I+1$ levels, i.e., $m_I = +3/2, +1/2, -1/2$ and $-3/2$, the quadrupolar term couples the electric field gradient of the magnetic moment, causing an uneven separation between m_I states. A spin Hamiltonian of the form (2) describes the system (Ishikawa et al., 2005; Taran et al., 2019):

$$\mathcal{H}_{\text{TbPC}_2} = \mathcal{H}_{lf} + \mu_B \mu_0 H \hat{g} J + A_{hyp} I \cdot J + I \hat{P}_{quad} I \quad (2)$$

In (2) the second term is the Zeeman interaction, and the third and fourth terms are the hyperfine and quadrupolar interactions, correspondingly.

Coherence and Spin Relaxation

For the integration of SMMs in devices, working under quantum mechanical laws, an important aspect is to perform logical operations without losing the information during the computational time. Two parameters characterise the performance of the system: the spin-lattice relaxation time, T_1 , and the spin-spin relaxation time, T_2 . T_1 describes the time the magnetisation takes to return to the thermal equilibrium along the z -axis after being tipped 90° . T_2 , or coherence time, describes the superposition lifetime, i.e., the operational time. Physically, T_2 is determined by tipping the magnetisation 90° to the xy -plane from its thermal equilibrium position. T_1 and T_2 are interwoven, as the coherence time is limited by T_1 , as $2T_1 \geq T_2$, especially at high temperatures. Similar or even better relaxation times have been observed in SMMs, hence, making SMMs plausible basic units for quantum computers, i.e., the quantum bit or Qubit (Fig. 1C).

The electronic ground state in SMMs is expected to remain frozen below a certain threshold temperature; nevertheless, temperature-dependent relaxation mechanisms become important when the thermal energy is comparable to the barrier. Hence, the system can relax via various thermally activated mechanisms. Phonon-assisted or Spin-lattice

relaxation mechanisms contribute to the relaxation of the magnetisation significantly by modulating the ligand field through vibrations, triggering modulation on the crystal field henceforth prompting transitions between the different spin states. The relaxation channels arise *via* absorption and/or emission of one or two phonons. These processes are contingent upon the nature of the ion involved, i.e., Kramers or non-Kramers ions. For a Kramers ion, a minimum degeneracy of two is retained, while for non-Kramers ions the degeneracy can be completely removed. Generally, three processes are predominantly involved in the relaxation dynamics of *f*-SMMs: (i) direct, (ii) Raman and (iii) Orbach process (Fig. 2). In the direct mechanism, the relaxation takes place through the emission of one phonon of energy. Nonetheless, in Orbach and Raman, the relaxation comprises the absorption and reemission of phonons. Whilst the relaxation in the Orbach process goes through a real excited state, the Raman relaxes *via* a virtual excited state. The understanding of the relaxation mechanisms (Albino et al., 2019; Briganti et al., 2021; Ganzhorn et al., 2016; Kragoskow et al., 2022; Mirzoyan & Hadt, 2020; Santanni et al., 2021) has permitted the synthesis of SMMs with remarkably improved properties (Goodwin et al., 2017; Gould et al., 2022; Guo et al., 2018)

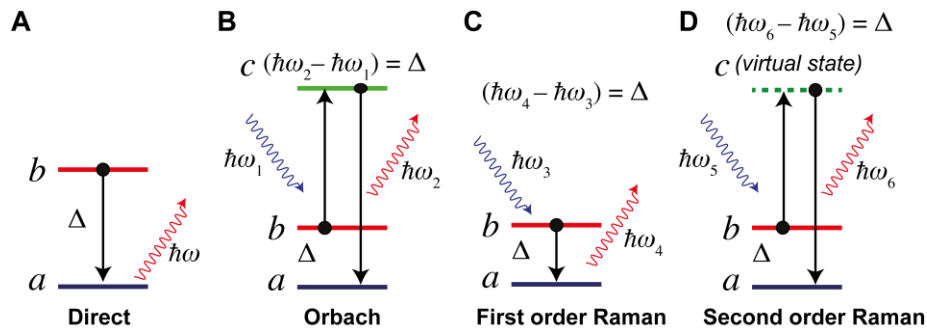


Figure 2. Spin-lattice relaxation processes in SMMs. (A) *Direct relaxation process*: a phonon with the energy difference between states a and b is absorbed/emitted causing a transition between the states. (B) *Orbach process*: the absorption of a phonon excites the spin to a low-lying excited state, followed by de-excitation to state a and emission of a photon of energy corresponding to the difference in energy of the low-lying excited state and the ground state. (C) *First order Raman process*: the difference in energy of the scattered phonon causes a de-excitation from state b to a . (D) *Second order Raman process*: the difference in energy of the scattered phonon is absorbed by the spin. The spin system is excited to a virtual excited state, followed by de-excitation to the ground state.

Quantum Tunnelling of the Magnetisation

The observation of quantum effects has been in the mind of scientist since the early days of the quantum theory. Quantum Tunnelling of the Magnetisation (QTM) is one clear example. The quest of QTM dates to the early 70s in nanoparticles, however, due to inhomogeneities in the size of the particles, the observation stayed elusive until the early 1990s. The advent of the field of molecular magnetism was key for the first observation of QTM in the archetypal Mn_{12} . QTM acts as a non-thermally activated relaxation, providing an alternative route for the relaxation (Gatteschi & Sessoli, 2003). QTM also allows spin reversal under barrier if superposition of the $\pm m_J$ states exist. In the presence of transverse fields, the degeneracy at the crossing is converted into an avoided level crossing, with a separation $\Delta_{m,m'}$ (Fig. 1B). The eigenvectors of the Hamiltonian at the avoided crossing are a linear admixture of the positive and negative spin projections, comprising a finite probability of the spin at both sides of the barrier. Hence, spin tunnelling denotes the resonance of the spin at both orientations. The Landau-Zener-Stückelberg (LZS) model describes the tunnelling probability, P_{LS} , between states m and m' when sweeping the magnetic field at a rate, α , through the resonance (3):

$$P_{LS} = 1 - \exp\left(-\pi\omega_T \frac{\delta H_0}{\alpha}\right) \quad (3)$$

where ω_T is the angular frequency of oscillation between states m and m' . This is related to the tunnel splitting by $\Delta_{m,m'} = 2\hbar\omega_T^{m,m'}$. The bare tunnel width, field interval where tunnelling is predicted to occur is given by $\delta H_0 = \frac{\Delta_{m,m'}}{g\mu_B\mu_0|m-m'|}$.

It is to be noted that although QTM acts as temperature independent relaxation mechanism, undesired for high-density data storage applications, it plays an significant role in the initialisation, manipulation and read-out of nuclear spins in the TbPc_2 complex, which ultimately lead to the realisation of the Grover's quantum algorithm (Godfrin et al., 2017; Grover, 1997). QTM has also allowed the read-out of the hyperfine-coupled nuclear spin states of a Tb_2Pc_3 SMM in a single crystal (Moreno-Pineda et al., 2018) and in a spin transistor configuration (Biard et al., 2021).

SMMs as Quantum Bits (Qubits) and Multilevel Quantum Bits (Qudits)

SMMs can act as quantum bits or qubits. Contrasting the classical bit, the qubit can exist as superposition of the $|1\rangle$ or $|0\rangle$ states, i.e. $|\psi\rangle = a_0|0\rangle + a_1|1\rangle$ where the squares of a_0 and a_1 are the amplitude of the probability following $|a_0|^2 + |a_1|^2 = 1$ (Fig. 1C and 3A). The advantage of qubits to perform immensely large and complex operations resides in the non-orthogonal configurations providing 2^N states, with N being the number of qubits.

Physical systems to be considered as qubits have to meet certain prerequisite better known as DiVincenzo criteria (DiVincenzo, 2000): (i) well-defined scalable levels; (ii) long coherence times to perform the computational operation; (iii) initialisation of the well-defined states; (iv) ability to carry out universal quantum gates *via* entanglement and/or superposition of states; (v) read-out of the states after the operation. Two other factors are important for quantum communication (DiVincenzo, 2000): (vi) interconversion between dynamic and stationary qubits and (vii) precise transmission of dynamic qubits. These two are indispensable for the efficient transmission of information when employing photons and for non-local qubits (Milburn, 2009).

The facile manipulation of the electronic spins in SMMs, makes electron spin qubits suitable systems for quantum technologies, whereby their manipulation is accessible through application of thermal stimuli, magnetic fields or electromagnetic pulses (Balakrishnan, 2014; Kiktenko et al., 2015a; Kiktenko et al., 2015b; Mohammadi et al., 2011; O'Leary et al., 2006; Popov et al., 2016; Rungta et al., 2007). Recently, systems known as *qudits* (Fig. 3B), where the d represents its multilevel character, have gained increasing attention due to the possibility to employ their multilevel nature to conduct complex algorithms in a single physical unit (Atzori et al., 2018; Atzori et al., 2016a; Atzori et al., 2017; Atzori et al., 2016b; Balakrishnan, 2014; Biard et al., 2021; Fataftah et al., 2016; Gedik et al., 2015; Kiktenko et al., 2015; Luo & Wang, 2014; Mohammadi et al., 2011; Moreno-Pineda et al., 2017; Moreno-Pineda et al., 2018; Yu et al., 2016). *Qudits* offer several advantages over *qubits*, such as d^N orthogonal states, tolerating parallelisation in a single unit with lower error rates compared to *qubits* (Gottesman, 1999; O'Leary et al., 2006; Richart et al., 2012). It has been proposed that the

excited energy states in SMMs can be employed for the realisation of complex quantum gates (Biard et al., 2021; Leuenberger & Loss, 2001; Moreno-Pineda et al., 2017; Moreno-Pineda et al., 2018). Some of the advantages of Qudits over qubits are:

- (i) To perform qugates do not require inter-qubit interaction (Balakrishnan, 2014; Gedik et al., 2015; Kiktenko, Fedorov, Strakhov, et al., 2015);
- (ii) reduced number of gates to execute a computational task (Richart et al., 2012);
- (iii) parallelisable information in a smaller number of physical units (O’Leary et al., 2006);
- (iv) simpler quantum simulations with similar Hilbert space (Neeley et al., 2009);
- (v) lower error rates (Gottesman, 1999; Kues et al., 2017);
- (vi) for quantum cryptography entangled qudits are better suited (Richart et al., 2012);
- (vii) implementation of complex gates in a single unit (Balakrishnan, 2014; Luo & Wang, 2014; Mohammadi et al., 2011; Ralph et al., 2007);
- (viii) large number of operational states with a reduced number of processing units (Kues et al., 2017; Neves et al., 2005).

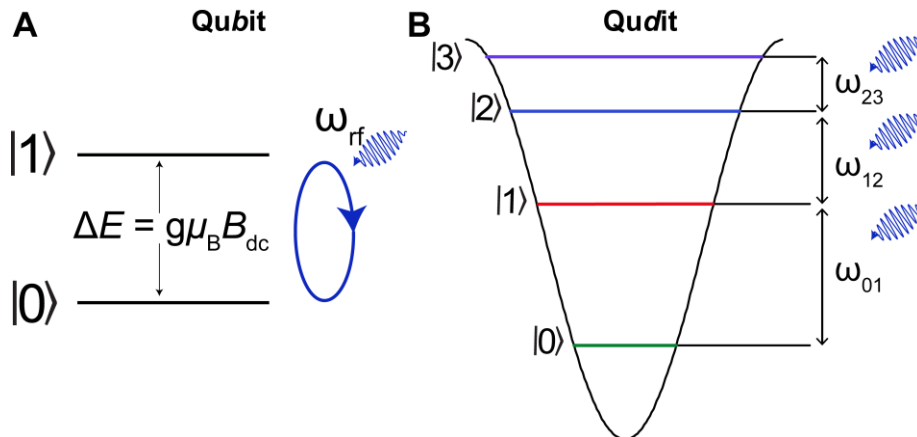


Figure 3. Quantum Computer Building Blocks: (A) Schematic view of the two-level composing the Qubit. Manipulation of these states can be achieved *via* resonant pulses between the states. (B) Multilevel representation of a Qudit ($d = 4$). The diverse accessible excited states can be exploited to perform quantum gates in a single physical unit.

Single Molecule Devices Incorporating SMMs

SMMs have been integrated in single-molecule devices, leading to unusual results. Taking advantages of the quantum characteristics of SMMs emphasising the possibility to integrate these systems in novel technological devices. Examples of SMMs integrated on devices are spin transistors and spin valves, ultimately enabling the manipulation and read-out of the spin states of the SMM implementation in a quantum algorithm. In the following sections, some key results of SMM integrated in devices and their quantum characteristics will be described.

SMM Spin Transistors

A spin transistor is three-terminal device, where electrons are passed through an SMM, bridging the gap of the junction, from the source to the drain. In this device configuration, it has been possible to manipulate and read-out the electronic states of SMMs. SMMs such as Mn_{12} (Heersche et al., 2006), Fe_4 (Nossa et al., 2013) and $TbPc_2$ (Godfrin et al., 2018, 2017; Thiele et al., 2013; Thiele et al., 2014; Vincent et al., 2012) have been integrated into spin transistor devices. However, out of these, the most important results have been accomplished when a $TbPc_2$ complex is trapped into gold junctions through electro-migration (Godfrin et al., 2018, 2017; S. Thiele et al., 2013; Thiele et al., 2014; Vincent et al., 2012) (Fig. 4A). The conduction of the electrons through the $TbPc_2$ complex results from the exceptionally stable redox state of the Tb^{3+} ion, and the π -radical delocalised over the Pc ligands (Godfrin et al., 2018; Godfrin et al., 2017; Thiele et al., 2013; Thiele et al., 2014; Vincent et al., 2012). The read-out of the states is achieved *via* indirect coupling, while the read-out is achieved due to the strong interaction between the π -radical and the Tb^{3+} spins. This allows the observation of change in conductance near zero field. A single charge-degeneracy point with a weak spin $S = 1/2$ Kondo effect, ascribed to the π -radical delocalised over the Pc rings is detected in the differential conductance (dI/dV) as a function of drain-source voltage (V_{ds}) and gate voltage (V_g). Extraordinarily, due to the ferromagnetic coupling between the $S = 1/2$ of the π radical to the magnetic moment of the Tb^{3+} ion, and the hyperfine coupling to the nuclear spin states of the Tb^{3+} ion, the transport properties reflect the spin cascade i.e., $|S = 1/2\rangle || J = 6\rangle || I =$

$3/2$). Close to the charge-degeneracy point, the spin cascade allows the read-out of the nuclear spin states by the spin-dot. Four abrupt jumps in the differential conductance are observed when sweeping the field. The jumps correspond to the reversal of the Tb^{3+} electron spin through QTM at the nuclear spin crossing (Fig. 4A (lower panel)).

The exceedingly efficient relaxation *via* QTM at fields between $\mu_0 H_z < \pm 50$ mT is of paramount importance for the detection of the spin reversals at these four level crossings (Thiele et al., 2014; Vincent et al., 2012). Furthermore, long T_1 (20 μs) and T_2 (300 μs) 20 and 300 microseconds, have been obtained, leading to their implementation of the Grover's algorithm using the four states of the nuclear spin (Godfrin et al., 2017) (*vide infra*) and the realisation of an iSWAP quantum gate (Godfrin et al., 2018). More recently, it has been possible to read-out the coupled nuclear spin states – through electronic states of the Tb^{3+} – in a spin transistor incorporating a Tb_2Pc_3 unit, opening the possibility of the implementation of more complex algorithms (Biard et al., 2021) (Fig. 4B,C).

The integration of SMMs in transistor configuration is also achievable by indirect coupling, in which the molecule is exposed to a weaker back-action. In the indirect coupling arrangement, the spin dot (SMM) is attached to the electrodes by a non-magnetic molecular conductor (read-out dot), in which the gate voltage regulates the coupling between the spin dot and the read-out dot.

SMM Spin Valve

SMMs have also been incorporated into devices in the supramolecular spin valve configuration. (Urdampilleta et al., 2011; Urdampilleta et al., 2013; Urdampilleta et al., 2015) studied this configuration in which a TbPc_2 acts as a spin dot and a carbon nanotube (CNT) acts as a read-out dot. The outstanding structural, electronic, and mechanical characteristics of CNTs make them suitable to act as read-out dot. The conductance traces are found to be sensitive to charge fluctuations, including the spin reversal process, and are accessible due to the sensible coupling between the SMM and CNT. Owing to the 1D conductor character of the CNT, along with the Kondo effect of the TbPc_2 and the

Coulomb blockade exhibited at low temperatures, make the conductance sensitive to charge fluctuations including the spin reversal process. The spin valve CNT-TbPc₂ configuration allows the determination of the electronic and nuclear spin characteristic of the Tb³⁺ ion (Urdampilleta et al., 2011, 2013; Urdampilleta et al., 2015). The read-out was possible through magneto-transport measurements, exploiting the strong interaction between the TbPc₂ molecules suspended on CNTs (Urdampilleta et al., 2013) (Fig. 4D). When the TbPc₂ molecules were aligned in a parallel configuration, a maximum in the conductance is observed (ferromagnetic coupling). In contrast, a minimum conductance was found when the electron spin of the TbPc₂ molecules were aligned antiparallel (antiferromagnetic coupling). Furthermore, the sensitivity of the measurements showcased differently oriented molecules onto the CNT. Additionally, similarly to the spin transistor, the nuclear spin states for each TbPc₂ onto the CNT were sensed by measuring the tunnelling probability as a function of sweep rate (Fig. 4E, F). Between ± 50 mT four level-crossings are observed, which are associated with the nuclear spin $I = 3/2$ on Tb³⁺. A spin-valve behaviour was observed, acting as a spin polariser-analyser revealing a strong magneto-resistive effect when two TbPc₂ molecules were on the CNT. For the SMM-CNT, working in two working regimes, the fine-tuning and the electronic detection/manipulation of a single magnetic moment were achieved.

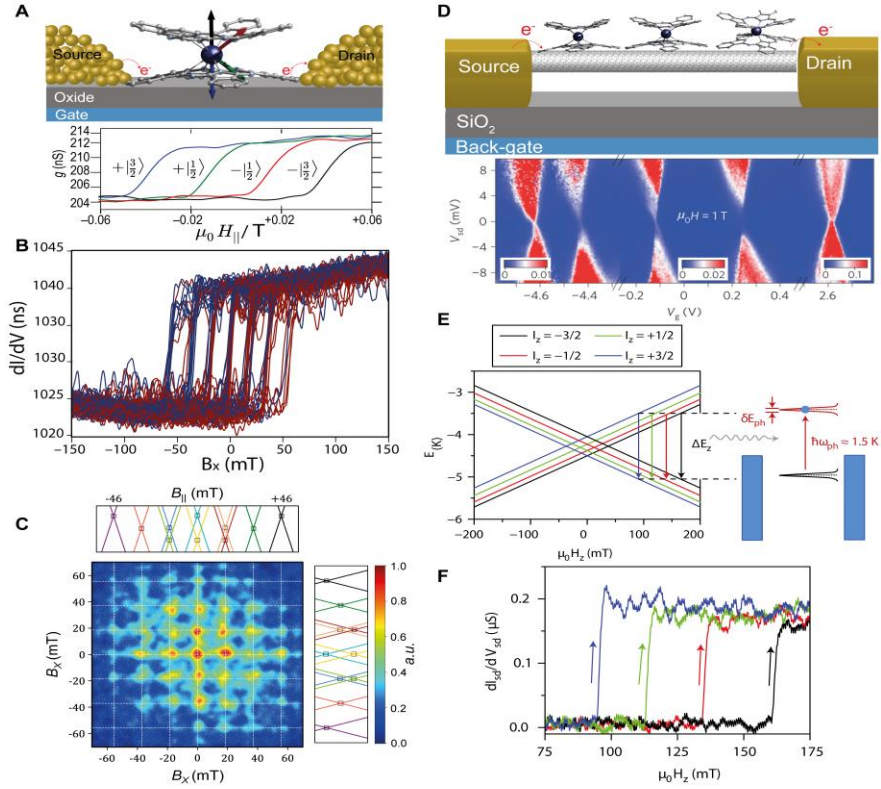


Figure 4. Quantum Spin Transistors and Spin Valves: (A) Pictorial view of a spin transistor with a TbPc₂ molecule bridging the gap between the source and drain (top) and differential conductance studies (dI/dV) as a function of drain-source voltage (V_{ds}) and gate voltage (V_g) (bottom). The conductance jumps correspond to the four-level crossings associated with the nuclear spin $I = 3/2$ of Tb³⁺. (B) dI/dV as a function of V_{ds} and V_g for a Tb₂Pc₃ spin transistor device. The conductance jumps correspond to spin reversal at the allowed QTM crossings. (C) Correlation measurement of spins reversals. The x -axis is the conductance jumps during a magnetic field sweep, and the y -axis the conductance jumps during subsequent sweeps. (D) Schematic view of the spin-valve device. A CNT acts as a read-out dot, connecting the drain and source, and the TbPc₂ acts as spin dots. (E) In the spin valve, the magnetisation reversal of the TbPc₂ occurs through a direct transition from the excitation of the electron into a vibrational state in the CNT resonator, revealing the nuclear spin states of the Tb³⁺. (F) Magnetisation reversal of the Tb³⁺ is induced by sweeping the magnetic field $\mu_0 H_z$ resulting in an abrupt increase in the differential conductance through the dot. The switching field is contingent upon the nuclear spin state. Panel (A) adapted from ref. (Stefan Thiele et al., 2014) and (Moreno-Pineda & Wernsdorfer, 2021) with permission from The American Association for the Advancement of Science (AAAS) and Springer Nature Limited Copyright © 2021, respectively. Panels (B) and (C) adapted from ref. (Biard et al., 2021) with permission from Springer Nature Limited Copyright © 2021. Panels (E) and (F) adapted from ref. (Ganzhorn et al., 2013) with permission from Springer Nature Limited Copyright © 2013.

Below 1 K a magnetoresistance of up to 300% was observed, implying the individual manipulation of a larger number of molecules suspended on the CNT through a local gate. This would grant the implementation of complex quantum computing protocols. Also, it was shown that in the spin valve configuration, QTM can be suppressed at low temperatures, due to one-dimensional phonons associated with the mechanical motion of the CNT (Ganzhorn et al., 2016). Solely a single mode (direct relaxation), associated with the mechanical motion of the CNT of one-dimensional phonons, correlated with the mechanical motion of CNT, allows relaxation to occur. The so-called quantum Einstein-de Hass effect would allow coherent spin manipulation of the spin states, opening the possibility of coherent manipulation of the spin and entanglement (Ganzhorn et al., 2016).

Towards Quantum Technologies Employing SMMs

The quantum nature displayed by SMMs makes them viable prospects for several technologies, such as quantum sensors, quantum simulators, and quantum computers. The predicted advantages exceed any classical equivalent. Also, as shown in the previous section, SMMs have been successfully incorporated in spin-transistor and spin-valve devices, paving the way to hybrid quantum devices. In the next section a succinct description of the most relevant requirements of SMMs is provided for each technological application in which they have been proposed.

Quantum Sensors

The use of quantum effects in novel technologies tries to exploit these effects to realise certain tasks not achievable with classical analogues. Quantum sensing, or Q-sensing, is an example of the exploitation of quantum effects for developing measuring and sensing protocols with enhanced capabilities. Extremely small fluctuations or perturbations can be sensed by exploiting the sensitivity of quantum states, as confirmed by the detection of gravitational waves employing squeezed states of light at the Advanced Light Interferometer Gravitational-Wave Observatory (aLIGO)(Aasi et al., 2013).

For the development of Q-sensing, two characteristics are of paramount importance: *(i)* quantum coherence and *(ii)* entanglement (Degen et al., 2017; Troiani et al., 2019; Yu et al., 2021). Well-defined levels, initialisation and read-out of their final states must characterise suitable

Q-sensing systems. Moreover, the coherent manipulation of the states of the system could be required for certain circumstances. For a successful Q-sensing protocol, the Q-sensor must interact with the system to be measured. This is in stark contrast to the characteristics of the basic unit for quantum computing. The interaction between the Q-sensor and the systems to be sensed triggers changes in the initial properties of the sensor, which can be inferred in the result of the measurement (Fig. 5A, B).

NV centres (Barry et al., 2016; Boss et al., 2017; Cooper et al., 2020; Dovzhenko et al., 2018; Jenkins et al., 2019; Kim et al., 2019; Lee-Wong et al., 2020; Lovchinsky et al., 2016; Radu et al., 2020; Shi et al., 2015), superconducting circuits (Degen et al., 2017), light (Aasi et al., 2013; Lawrie et al., 2019; Panajotov et al., 2004), silicon vacancies (Morley, 2014; Ohshima et al., 2018) and nuclear and electronic spins embedded in magnetic molecules (Troiani et al., 2019; Yu et al., 2021), amongst others, have been considered a plausible candidates for Q-sensors. Nevertheless, the characteristics of single atoms and molecules are better suited to perform sensing at a nanometre scale than any classical sensor, due to their spatial resolution (Troiani et al., 2019; Yu et al., 2021). The chemical control over the synthesis, the engineering of the structural, electronic and nuclear characteristics, make SMMs more appealing candidates for Q-sensing. Furthermore, the noise resilient characteristics of SMMs, preserving the coherence times, is of paramount importance for Q-sensors (Degen et al., 2017; Troiani et al., 2019; Yu et al., 2021). In this regard, the synthetic methodologies for the rational design of SMMs have led to the observation of long coherence times (Coronado, 2020; Gaita-Ariño et al., 2019; Wasielewski et al., 2020) (Fig. 5B). Pulse EPR studies have allowed the observation of long coherence times in the well-known $\{\text{Cr}_7\text{Ni}\}$ wheels. Similarly, enhancement of the coherence times of these systems (Wedge et al., 2012), which can remain robust when attached to one (Fernandez et al., 2015; Ferrando-Soria, et al., 2016; Timco et al., 2009) or more units (Ferrando-Soria et al., 2015), have been achieved, ultimately leading to their proposal for logic gates. Other examples show that through a rational design, in which decoherence sources are eliminated locally, has allowed the detection of long T_1 and T_2 times at room temperature and in bulk crystals (Atzori et al., 2016; Bader et al., 2014). Importantly, coherence times comparable to NV centres (Graham et al., 2017) have been observed in vanadyl-based complexes (Atzori et al.,

2018; Atzori et al., 2016a; Atzori et al., 2017; Atzori et al., 2016b; Fataftah et al., 2016; Graham et al., 2014; Shiddiq et al., 2016; Tesi et al., 2016; Yu et al., 2016; Zadrozny et al., 2014).

As an alternative strategy, long coherence times can be obtained by the preparation of magnetic noise resilient systems, eliminating the necessity of magnetic dilution. These are obtained by inducing an interaction that mixes the qubit states, e.g., hyperfine interaction, resulting in an avoided level crossing, termed “clock transitions” (CT). Systems with such characteristics become insensitive to external fluctuations of magnetic fields, leading to long T_2 . An example of magnetic resilient systems is a $[\text{Ho}(\text{W}_5\text{O}_{18})_2]^{9-}$ complex (HoW_{10}) with D_{4d} pseudo-axial symmetry (Shiddiq et al., 2016). The combination, hyperfine interactions, of crystal field and Zeeman splitting leads to avoided level crossings between the m_I levels of the same m_I . At the CT long T_2 at 5 K is found, offering a complementary strategy to achieve long T_2 values.

Q-sensors incorporating SMMs have been proposed for detecting physical parameters, such as temperature, electrical or magnetic fields, currents, nuclear spins, electronic spins, and magnons to even dark matter (Troiani et al., 2019; Yu et al., 2021) (Fig. 5C,D). An example of a Q-sensing proposal comprising an SMM is given by a single TbPc_2 molecule in a transistor configuration, acting as a local thermometer (C. Godfrin et al., 2019). In the transistor, the TbPc_2 molecule is coupled to a magnetic field, and it is in equilibrium with the thermal bath, acting as a temperature sensor.

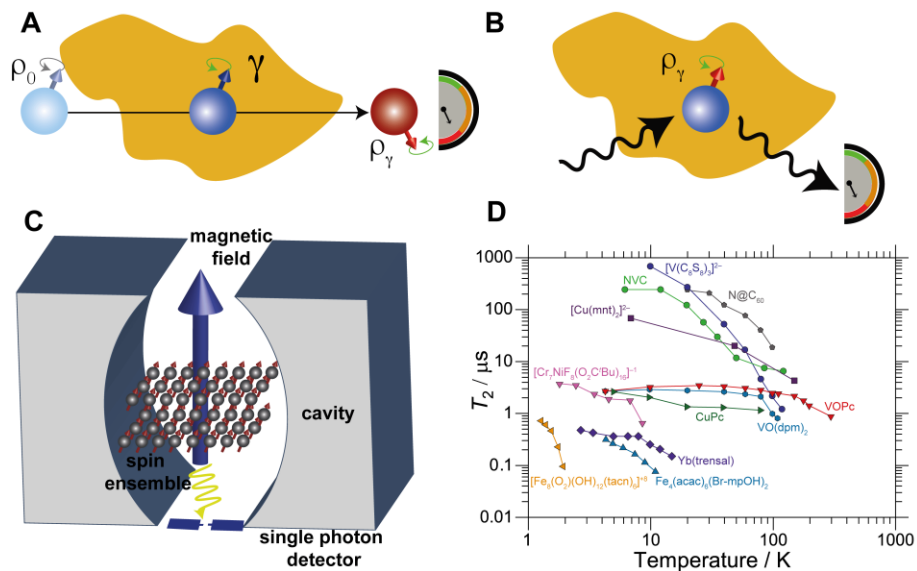


Figure 5. SMMs for Quantum Sensing: (A) The sensor is prepared in an initial state, and it is allowed to interact with the system under investigation. During the interaction, information on the unknown parameter is obtained. Measurements of the final state of the sensor allow the determination of the information of the system under study. (B) In the second configuration, the sensor is embedded in a structure, and its state contains information on the internal parameters of interest. (C) Representation of a spin ensemble in a microwave cavity. The system is driven in the strong coupling, the regime at low temperatures, for the efficient transfer of magnetic excitation to microwave photon. (D) Electron spin-spin relaxation (T_2) versus temperature for several molecular qubits. Panel (D) adapted from ref. (Moreno-Pineda, Godfrin, et al., 2018) with permission from The Royal Society of Chemistry.

An exponential law was found through the electrical read-out and monitoring of the spin-flip of the electronic spin after the application of non-resonant microwave pulses, hence acting as a thermometer. Spin-polarised Scanning Tunnelling Microscope (SP-STM) (Wiesendanger et al., 1990; Wiesendanger, 2009), combined with electromagnetic pulses (Troiani et al., 2019), have been also proposed for local sensing. The procedure involves the application of a microwave pulse, which prompts an electronic transition, henceforth, altering the population of the centre which is successively detected by the SP-STM tip (Bae et al., 2018; Moreno-Pineda & Wernsdorfer, 2021; Willke et al., 2018; Willke, Paul, et al., 2018; Willke et al., 2019a; Willke et al., 2019b; Yang et al., 2017, 2019). An analogous protocol has been proposed for the detection of the electronic and nuclear spin properties of a TbPc_2 system. Spin

assemblies can in principle also allow the detection of magnetic fields in the strong coupling regime and for the detection of dark matter (Troiani et al., 2019) (Fig. 5C).

Quantum Simulators

In the early 1980s, Richard Feynman postulated that a computer implementing quantum effects could simulate quantum systems better than any classical analogue, highlighting the limitations of classical computers (Feynman, 1982). A system which exploits quantum effects can be prepared to mimic the dynamics of complex quantum mechanical problems.

SMMs are especially attractive systems given that these show all the requirements to act as qubits (Coronado, 2020; Crippa et al., 2021; Gaita-Ariño et al., 2019; Moreno-Pineda, et al., 2018; Sugisaki et al., 2019; Wasielewski et al., 2020). Furthermore, SMMs can mimic the evolution of quantum mechanical problems and their structural and electronic properties can be tuned by chemical means. An aspect of paramount importance for the realisation of quantum operation is the possibility of bringing two qubits into proximity to accomplish quantum gates (Aguilà et al., 2014; Aromí et al., 2012; Atzori et al., 2018b; Ferrando-Soria et al., 2016; Luis et al., 2011; Montanaro, 2016; Nakazawa et al., 2012; Timco et al., 2009). Additionally, the multilevel character of SMMs can be exploited, utilising the various two-levels systems as qubit units (Moreno-Pineda et al., 2018; Stepanenko et al., 2008). Likewise, SMMs with a switchable interaction between two units can act as quantum simulators. The $\{\text{Cr}_7\text{Ni}\}$ dimers represent an example to simulate quantum gates (Chiesa et al., 2016; Chiesa et al., 2014; Ferrando-Soria et al., 2016) (Fig. 6A).

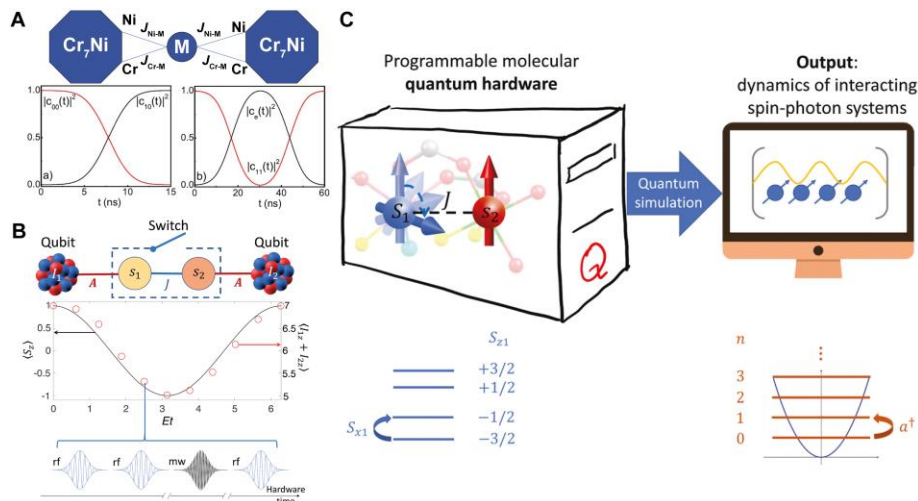


Figure 6. Quantum Simulations with SMMs: (A) Schematic representation of a pair of $\{\text{Cr}_7\text{Ni}\}$ rings, linked by a Ni^{2+} ion (to) and single-qubit rotation and simulation of a two-qubits gate-controlled φ ($C-\varphi$) (bottom). (B) View of a hybrid nuclear-electronic spin architecture. Quantum simulation of the oscillation of the magnetisation for an $S = 1$ spin experiencing QTM and sequence of pulses required for the simulation. (C) Schematic view of a multilevel molecular quantum simulator. The system is composed of a *qudit* spin S_1 coupled by exchange interaction J to a spin $s_2 = 1/2$. Panels (A) adapted from ref. (Alessandro Chiesa et al., 2014) and panel (B) adapted from ref. (Atzori, Chiesa, et al., 2018) and panel (C) adapted from ref. (Tacchino, Chiesa, Sessoli, Tavernelli, & Carretta, 2021) with permission from The Royal Society of Chemistry.

Atzori and co-workers described an important example for the implementation of an SMM for quantum simulations (Atzori et al., 2018b). The experiments were carried out employing a dimeric vanadium (IV) complex with formula $[\text{PPh}_4]_4[(\text{VO})_2(\text{L}_1)_2]$ ($\text{L}_1 =$ tetraanion of $\text{C}_6\text{H}_3(\text{OH})_2\text{-CONH-C}_6\text{H}_4\text{-CONH-C}_6\text{H}_3(\text{OH})_2$), utilising both the electronic and nuclear spins. In the vanadyl dimer, the electronic spins are coupled by an exchange interaction, while the electronic and nuclear states are coupled *via* the hyperfine interaction (Fig. 6B). This interaction allows the rotation of the electronic states, which is contingent upon the nuclei, therefore, the SMM can be implemented in two-qubits gates, where the indirect interaction acts as a switch. The long coherence and the strong hyperfine interaction make the system very appealing (Atzori et al., 2016a; Atzori et al., 2016b; Graham et al., 2017; Yu et al., 2016; Zadrozny et al., 2014; Zadrozny et al., 2015). A controlled shift ($C\varphi$) two qubits quantum gate,

which generates entanglement between the qubits adding a phase to one of the states, whilst leaving the remaining three states unaffected, was achieved by exploiting the multilevel character of the system. By utilising the vanadyl dimer as a quantum simulator, it was possible to simulate the quantum tunnelling of the magnetisation of $S = 1$, with high fidelities.

More recently, an SMM acting as *qudits* unit (Atzori et al., 2018a; Atzori et al., 2016a; Atzori et al., 2017; Atzori et al., 2016b; Balakrishnan, 2014; Biard et al., 2021; Fataftah et al., 2016; Gedik et al., 2015; Kiktenko et al., 2015; Luo & Wang, 2014; Mohammadi et al., 2011; Moreno-Pineda et al., 2017; Moreno-Pineda et al., 2018; Yu et al., 2016), comprising a dimer based on two spins, i.e., an $S = 1/2$ and $S \geq 3/2$ spins, manipulated by microwave pulses, have been proposed as quantum simulator for light-matter interactions (Fig. 6C). The scheme exploits the spin S ion to encode the photon field facilitating the digital simulation of a broad range of spin-boson models with a higher efficiency than multi-qubit units (Tacchino et al., 2021).

Quantum Computers

Feynman's proposal for the efficient simulation of quantum systems employing a quantum computer (Feynman, 1982) was backed by Shor (Shor, 1997), Grover (Grover, 1997), Lloyds (Lloyd, 1993), among others when they highlighted that a quantum computer would offer unparalleled advantages over classical computers. Today, the field of quantum computing is an active field and ever-growing field, incorporating several companies and consortiums. These have invested staggering amounts of money in the quest for a functional quantum computer.

Due to the facile manipulation of the electronic spins of SMMs, these have been proposed as electron spin qubits, whereby manipulation is achieved through the application of thermal stimuli, magnetic fields or electromagnetic pulses (Balakrishnan, 2014; Kiktenko et al., 2015a; Kiktenko et al., 2015b; Mohammadi et al., 2011; O'Leary et al., 2006; Popov et al., 2016; Rungta et al., 2007). One important method for manipulation of the electronic spins of SMMs is Electron Paramagnetic Resonance (EPR) pulses, as shown with the $\{\text{Cr}_7\text{Ni}\}$ antiferromagnetic

wheels. A strong antiferromagnetic coupling between the Cr^{3+} and Ni^{2+} comprising the wheel leads to a well-defined and isolated spin $S = \frac{1}{2}$ ground state (Troiani et al., 2005). Besides transition metal-based SMMs, lanthanide-based SMMs have also been proposed as qubits (Aguilà et al., 2014; Pedersen et al., 2016; Shiddiq et al., 2016) owing to their inherent magnetic anisotropy and ground doublet state characteristics. A cNOT gate was proposed employing an asymmetric lanthanide dimer with a small interaction between the Ce^{3+} and Er^{3+} lanthanide ions. In principle, the electronic states in the dimer can be manipulated by resonance frequencies or fields (Aguilà et al., 2014).

The advantage of the utilisation of *qudits* was shown in a gadolinium polyoxometalate complex with the formula $\text{K}_{12}\text{Gd}(\text{H}_2\text{O})\text{P}_5\text{W}_{30}\text{O}_{110}\cdot 27.5\text{H}_2\text{O}$ (GdW_{30}) (Jenkins et al., 2017; Martínez-Pérez et al., 2012). EPR studies show that the eight electronic states, arising from the $S = 7/2$ state, can be manipulated by EPR pulses¹¹⁰. Long coherence values were found, T_2 between 400 and 600 ns and T_1 between 2.3 to 2.6 μs were determined. Due to the accessible states and the ability to manipulate them, it was possible to carry out a controlled-controlled-NOT (cNOT) or Toffoli gate, highlighting the advantages of multilevel systems.

The previous examples demonstrate the importance of the electronic states embedded in SMMs for their implementation in quantum information technologies. Nonetheless, the electron spin is extremely susceptible to fluctuation originating from the spin bath and neighbouring molecules. Moreover, the majority of explored SMMs have been investigated on large assemblies, which in turn, could compromise the initialisation, manipulation, and coherence characteristics due to inhomogeneity effects. Towards the integration of SMMs in hybrid spintronic devices, in which the magnetic molecules would be in direct contact with metallic leads, systems possessing larger robustness are sought (Moreno Pineda et al., 2016). In this context, the TbPc_2 molecule has been proven to act as a nuclear spin *qudit*, with the four nuclear states acting as quantum register, ultimately leading to the realisation of a quantum algorithm.

The TbPc_2 molecule is a remarkably stable system and have been deposited in numerous substrates (Moreno Pineda et al., 2016) and integrated into spin transistors and spin valve configurations (*vide*

supra). When TbPc₂ has been embedded in a transistor device configuration, the electrical manipulation and read-out of the electronic properties of the molecule have been achieved by injecting electrons through the source – TbPc₂ – drain, allowing to sense of the charge state of the molecule. The read-out of the nuclear states is then feasible due to the indirect coupling between the electronic spin and nuclear spin *via* the hyperfine interaction (Godfrin et al., 2017) (*vide supra*). At subkelvin temperatures and low applied fields, initialisation of the four nuclear qudits states, i.e., $|m_I = \pm 1/2\rangle$ and $|m_I = \pm 3/2\rangle$ (Thiele et al., 2013; Thiele et al., 2014), is achieved. Furthermore, the uneven separation of the nuclear states, resulting from the quadrupolar interaction (Thiele et al., 2014), allows the manipulation of these states (Fig. 7A,B). Long T_1 and T_2 values were observed, which along with the ability to read out, initialise and manipulate the nuclear states, allowed the implementation of the Grover’s algorithm (Godfrin et al., 2017) (Fig. 7C,D).

An additional aspect of the implementation of SMMs in quantum information technologies is the ability to protect the information from quantum noise and decoherence sources. In this regard, quantum error correction (QEC) is essential for the development of fault-tolerant universal quantum computing. QEC in principle, reduces errors arising from noise, gates operation, faulty initialisation, manipulation, and measurements of the quantum information. QEC schemes work encoding the quantum information into systems possessing more than two energy levels “*logical qubits*”; these qubits can bring the system into a well-defined state outside the computational subspace, hence, enabling the detection of errors and their correction. For the execution of common QEC protocols, the logical qubits are encoded in several ancillary states and several other physical units (Aguilà et al., 2014; Atzori, Chiesa, et al., 2018; Chiesa et al., 2014; Ferrando-Soria et al., 2016a; Ferrando-Soria et al., 2016b; Luis et al., 2011; Shiddiq et al., 2016; Zadrozny et al., 2015). Due to the requirement of non-local states in distinct objects to carry out QEC and quantum computation, this protocol seems not very viable. Alternatively, to circumvent this problem, the logical qubits can be encoded in a single-multilevel quantum object, or qudit (Atzori, Benci, et al., 2018; Atzori et al., 2016a; Atzori et al., 2017; Atzori et al., 2016b; Biard et al., 2021; Fataftah et al., 2016; Moreno-Pineda et al., 2017; Moreno-Pineda et al., 2018; Yu et al., 2016).

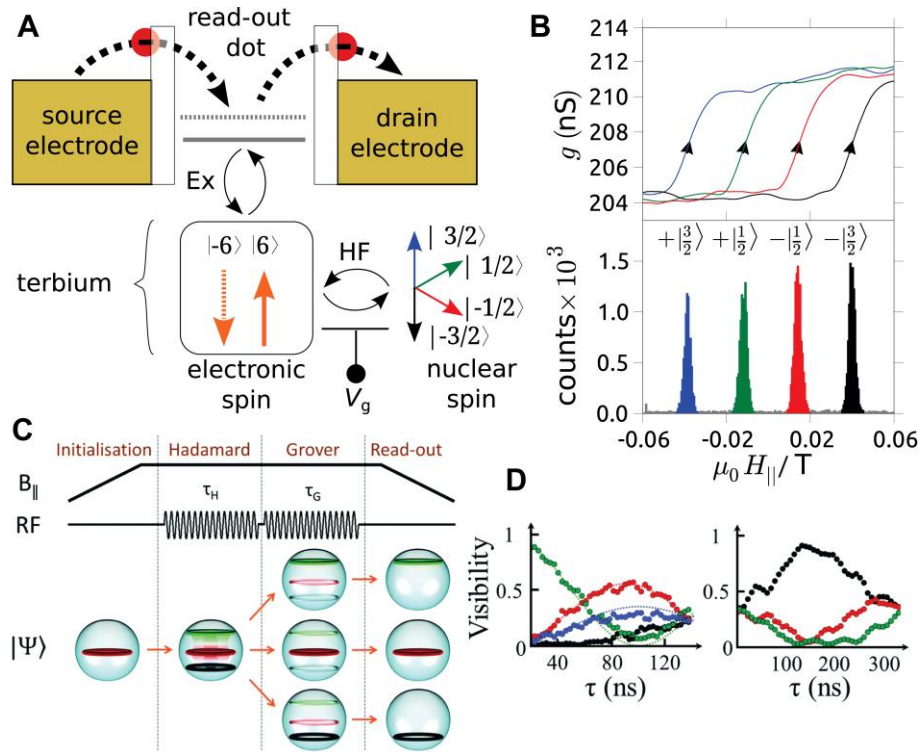


Figure 7. Quantum Computing with SMMs: (A) Schematic view of the read-out cascade occurring in $[\text{TbPc}_2]$ in the transistor device. (B) (top) hysteresis loops obtained from conductance measurements and (bottom) histograms of the conductance jumps corresponding to the nuclear states in the $[\text{TbPc}_2]$. (C) Grover algorithm is implemented using four different steps: initialisation, Hadamard gate, Grover gate and final read-out. (D) (left) Evolution of the population as a function of the Hadamard gate pulse length. (Right) Evolution of the population in the function of the Grover gate pulse length. Starting from a superposed state (obtained by a Hadamard pulse sequence) the system oscillated between this superposed state and the desired state (black points). Panels (A) and (B) adapted from ref. (Stefan Thiele et al., 2014) with permission from The American Association for the Advancement of Science (AAAS). Panels (C) and (D) adapted from ref. (Moreno-Pineda et al., 2018) with permission from The Royal Society of Chemistry.

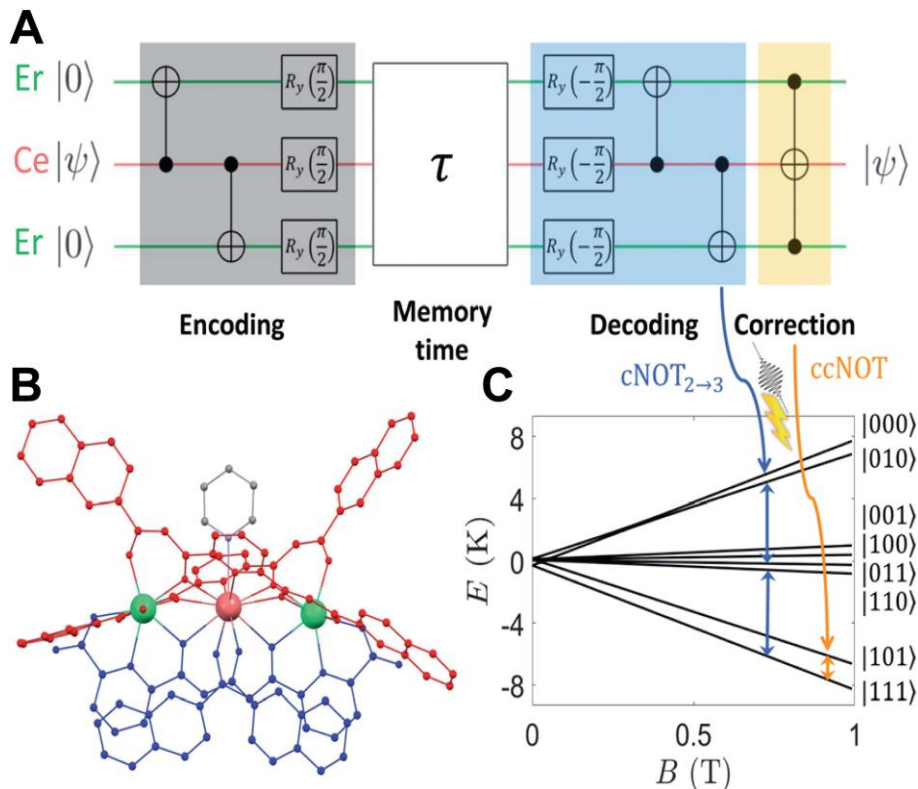


Figure 8. Quantum Computing with SMMs: (A) Three-qubit phase-flip repetition code quantum circuit. The central qubit carries the information, while the remaining act as auxiliary qubits. (B) Molecular structure of *f*-SMM (Er, green, and Ce, light red) corresponding to the qubits of the circuit depicted in (A). (C) Energy levels as a function of the external field B applied along z (the Er–Ce direction). Adapted from ref. (Macaluso et al., 2020) with permission from The Royal Society of Chemistry.

In this context, SMMs seem very appealing due to their multilevel characteristics. An example of such advantages in SMMs for QEC, a heterometallic trinuclear [ErCeEr] trinuclear complex, with an interaction connecting the Er–Ce pair, as determined by SQUID magnetometry, heat capacity and EPR spectroscopy (Fig. 8) (Macaluso et al., 2020), was shown to be suitable for QEC protocols. Numerical simulation showed that the [ErCeEr] complex can be exploited in a three-qubit repetition code to protect qubits from single-bit or phase-flip errors (Fig. 8A) (Nielsen & Chuang, 2012). The correction protocol involves *encoding*, *decoding* and *correction* stages. Two controlled-NOT (cNOT) two-qubit gates inducing a flip on the target qubit, which is protected from error due to entanglement, comprises the *encoding* step. A *memory* time stores the qubit, while the decoding (reverse

encoding) is implemented subsequently. A single controlled-controlled-NOT (ccNOT) gate applied to the qubit acts as a correction step. As determined by numerical simulations, the SMMs can efficiently shield the encoded information in the qubit from decoherence.

A {Cr₇Ni}-Cu system, in which the electronic state of the {Cr₇Ni} and the nuclear state embedded in the Cu ion can also be exploited for error correction(Lockyer et al., 2021). Execution of complex quantum algorithms required idle times, between sets of quantum operations for long times. The nuclear spins embedded in the Cu²⁺, are employed as quantum memory to store information during idle times. By exploiting the nuclear states in the Cu²⁺, acting as storage states with quantum error correction, it was shown that information can be protected for times much longer than the processor coherence. Unquestionably, these examples paved the way for SMMs for universal fault-tolerant quantum computer architectures(Chiesa et al., 2020).

CONCLUSIONS

SMMs have been in the heart of many studies since their discovery in the early 1990s, leading to the observation of intriguing quantum effects. After more than 30 years of intensive research of SMMs, the acquired knowledge of these systems placed them as a promising candidate for new technological applications. Today, it is possible to observe energy barriers to the relaxation well above liquid nitrogen temperatures (Goodwin et al., 2017; Gould et al., 2022; Guo et al., 2018), systems having extraordinary long coherence times (Coronado, 2020; Gaita-Ariño et al., 2019; Wasielewski et al., 2020) the manipulation of their quantum states to their integration of hybrid spin architectures (Biard et al., 2021; Godfrin et al., 2018, 2017; S. Thiele et al., 2013; Stefan Thiele et al., 2014; Urdampilleta et al., 2011, 2013; Urdampilleta et al., 2015; Vincent et al., 2012), eventually, permitting the execution of the quantum Grover's algorithm(C. Godfrin et al., 2017). The achievements reached up to this point, acting as first quantum revolution, can be considered as the scaffolding for developing novel technologies. Towards the utilisation of quantum properties in technological applications, the *second quantum revolution* endeavours to engineer and implement these in hybrid devices. Due to the remarkable control gained of SMMs till today, over their structural, electronic, and nuclear characteristics, these molecules close of being part of novel

technologies. The coherence and spatial resolution, make these systems plausible quantum sensors. Moreover, they have been shown to viable to act as quantum simulators and fault-resilient quantum computers.

While we did not intend to comprehensively compile the results obtained in the very active and promising field of SMMs, we hope to have provided here an interesting overview of actions, which evidence the manifestation of quantum mechanical effects through prospects of systems and devices integrated by SMMs for state-of-the-art technological applications. Applications such as these are likely to play a leading role in the future development of SMMs, changing the paradigm, just as nanoscience did.

REFERENCES

Aasi, J., Abadie, J., Abbott, B. P., Abbott, R., Abbott, T. D., Abernathy, M. R., ... Zweizig, J. (2013). Enhanced sensitivity of the LIGO gravitational wave detector by using squeezed states of light. *Nature Photonics*, 7(8), 613–619. <https://doi.org/10.1038/nphoton.2013.177>

Aguilà, D., Barrios, L. A., Velasco, V., Roubeau, O., Repollés, A., Alonso, P. J., ... Aromí, G. (2014). Heterodimetallic [LnLn'] lanthanide complexes: Toward a chemical design of two-qubit molecular spin quantum gates. *Journal of the American Chemical Society*, 136(40), 14215–14222. <https://doi.org/10.1021/ja507809w>

Albino, A., Benci, S., Tesi, L., Atzori, M., Torre, R., Sanvito, S., ... Lunghi, A. (2019). First-Principles Investigation of Spin-Phonon Coupling in Vanadium-Based Molecular Spin Quantum Bits. *Inorganic Chemistry*, 58(15), 10260–10268. <https://doi.org/10.1021/acs.inorgchem.9b01407>

Aromí, G., Aguilà, D., Gamez, P., Luis, F., & Roubeau, O. (2012). Design of magnetic coordination complexes for quantum computing. *Chemical Society Reviews*, 41(2), 537–546. <https://doi.org/10.1039/c1cs15115k>

Arute, F., Arya, K., Babbush, R., Bacon, D., Bardin, J. C., Barends, R., ... Martinis, J. M. (2019). Quantum supremacy using a programmable superconducting processor. *Nature*, 574(7779), 505–510. <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1666-5>

Atzori, M., Benci, S., Morra, E., Tesi, L., Chiesa, M., Torre, R., ... Sessoli, R. (2018a). Structural Effects on the Spin Dynamics of Potential Molecular Qubits. *Inorganic Chemistry*, 57(2), 731–740. <https://doi.org/10.1021/acs.inorgchem.7b02616>

Atzori, M., Chiesa, A., Morra, E., Chiesa, M., Sorace, L., Carretta, S., ... Sessoli, R. (2018b). A two-qubit molecular architecture for electron-mediated nuclear quantum simulation. *Chemical Science*, 9(29), 6183–6192. <https://doi.org/10.1039/c8sc01695j>

Atzori, M., Morra, E., Tesi, L., Albino, A., Chiesa, M., Sorace, L., & Sessoli, R. (2016a). Quantum Coherence Times Enhancement in Vanadium(IV)-based Potential Molecular Qubits: The Key Role of the Vanadyl Moiety. *Journal of the American Chemical Society*, 138(35), 11234–11244. <https://doi.org/10.1021/jacs.6b05574>

Atzori, M., & Sessoli, R. (2019). The Second Quantum Revolution: Role and Challenges of Molecular Chemistry. *Journal of the American Chemical Society*, 141(29), 11339–11352. <https://doi.org/10.1021/jacs.9b00984>

Atzori, M., Tesi, L., Benci, S., Lunghi, A., Righini, R., Taschin, A., ... Sessoli, R. (2017). Spin Dynamics and Low Energy Vibrations: Insights from Vanadyl-Based Potential Molecular Qubits. *Journal of the American Chemical Society*, 139(12), 4338–4341. <https://doi.org/10.1021/jacs.7b01266>

Atzori, M., Tesi, L., Morra, E., Chiesa, M., Sorace, L., & Sessoli, R. (2016b). Room-Temperature Quantum Coherence and Rabi Oscillations in Vanadyl Phthalocyanine: Toward Multifunctional Molecular Spin Qubits. *Journal of the American Chemical Society*, 138(7), 2154–2157. <https://doi.org/10.1021/jacs.5b13408>

Bader, K., Dengler, D., Lenz, S., Endeward, B., Jiang, S. Da, Neugebauer, P., & Van Slageren, J. (2014). Room temperature quantum coherence in a potential molecular qubit. *Nature Communications*, 5(1), 5304. <https://doi.org/10.1038/ncomms6304>

Bae, Y., Yang, K., Willke, P., Choi, T., Heinrich, A. J., & Lutz, C. P. (2018). Enhanced quantum coherence in exchange coupled spins via singlet-triplet transitions. *Science Advances*, 4(11), eaau4159.

<https://doi.org/10.1126/sciadv.aau4159>

Balakrishnan, S. (2014). Various Constructions of Qudit SWAP Gate. *Physics Research International*, 2014, 1–5. <https://doi.org/10.1155/2014/479320>

Barco, E. del, Hernandez, J., Tejada, J., Biskup, N., Achey, R., Rutel, I., ... Brooks, J. (2000). High-frequency resonant experiments in molecular clusters. *Physical Review B - Condensed Matter and Materials Physics*, 62(5), 3018–3021. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.62.3018>

Barry, J. F., Turner, M. J., Schloss, J. M., Glenn, D. R., Song, Y., Lukin, M. D., ... Walsworth, R. L. (2016). Optical magnetic detection of single-neuron action potentials using quantum defects in diamond. *PNAS*, 113(49), 14133–14138. <https://doi.org/10.1073/pnas.1601513113>

Bertaina, S., Gambarelli, S., Mitra, T., Tsukerblat, B., Müller, A., & Barbara, B. (2008). Quantum oscillations in a molecular magnet. *Nature*, 453(7192), 203–206. <https://doi.org/10.1038/nature06962>

Biard, H., Moreno-Pineda, E., Ruben, M., Bonet, E., Wernsdorfer, W., & Balestro, F. (2021). Increasing the Hilbert space dimension using a single coupled molecular spin. *Nature Communications*, 12(1), 4443. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-24693-6>

Bogani, L., & Wernsdorfer, W. (2008). Molecular spintronics using single-molecule magnets. *Nature Materials*, 7(3), 179–186. <https://doi.org/10.1038/nmat2133>

Boss, J. M., Cujia, K. S., Zopes, J., & Degen, C. L. (2017). Quantum sensing with arbitrary frequency resolution. *Science*, 356(6340), 837–840. <https://doi.org/10.1126/science.aam7009>

Briganti, M., Santanni, F., Tesi, L., Totti, F., Sessoli, R., & Lunghi, A. (2021). A Complete Ab Initio View of Orbach and Raman Spin–Lattice Relaxation in a Dysprosium Coordination Compound. *Journal of the American Chemical Society*, 143(34), 13633–13645. <https://doi.org/10.1021/jacs.1c05068>

Bruce, D. W., O'hare, D., & Walton, R. I. (n.d.). *Molecular Materials (Inorganic Materials Series)*. Candini, A., Lorusso, G., Troiani, F., Ghirri, A., Carretta, S., Santini, P., ... Affronte, M. (2010). Entanglement in supramolecular spin systems of two weakly coupled antiferromagnetic rings (purple-Cr7Ni). *Physical Review Letters*, *104*(3), 037203. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.104.037203>

Carretta, S., Santini, P., Amoretti, G., Guidi, T., Copley, J. R. D., Qiu, Y., ... Winpenny, R. E. P. (2007). Quantum oscillations of the total spin in a heterometallic antiferromagnetic ring: Evidence from neutron spectroscopy. *Physical Review Letters*, *98*(16), 167401. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.98.167401>

Chen, Y. C., Liu, J. L., Ungur, L., Liu, J., Li, Q. W., Wang, L. F., ... Tong, M. L. (2016). Symmetry-Supported Magnetic Blocking at 20 K in Pentagonal Bipyramidal Dy(III) Single-Ion Magnets. *Journal of the American Chemical Society*, *138*(8), 2829–2837. <https://doi.org/10.1021/jacs.5b13584>

Chen, Z., Molina-Jirón, C., Klyatskaya, S., Klappenberger, F., & Ruben, M. (2017). 1D and 2D Graphdiynes: Recent Advances on the Synthesis at Interfaces and Potential Nanotechnological Applications. *Annalen Der Physik*, *529*(11), 1–20. <https://doi.org/10.1002/andp.201700056>

Chiesa, A., Macaluso, E., Petiziol, F., Wimberger, S., Santini, P., & Carretta, S. (2020). Molecular Nanomagnets as Qubits with Embedded Quantum-Error Correction. *The Journal of Physical Chemistry Letters*, *11*(20), 8610–8615. <https://doi.org/10.1021/acs.jpcllett.0c02213>

Chiesa, Alessandro, Santini, P., & Carretta, S. (2016). Supramolecular Complexes for Quantum Simulation. *Magnetochemistry*, *2*(4), 37. <https://doi.org/10.3390/magnetochemistry2040037>

Chiesa, A., Whitehead, G. F. S., Carretta, S., Carthy, L., Timco, G. A., Teat, S. J., ... Santini, P. (2014). Molecular nanomagnets with switchable coupling for quantum simulation. *Scientific Reports*, *4*(1), 7423. <https://doi.org/10.1038/srep07423>

Christou, G. (1993). Manganese carboxylate aggregates of biological relevance. *Journal of Inorganic Biochemistry*, *51*(1–2), 445. [https://doi.org/10.1016/0162-0134\(93\)85473-L](https://doi.org/10.1016/0162-0134(93)85473-L)

Cooper, A., Sun, W. K. C., Jaskula, J. C., & Cappellaro, P. (2020). Identification and Control of Electron-Nuclear Spin Defects in Diamond. *Physical Review Letters*, *124*(8), 83602. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.124.083602>

Coronado, E. (2020). Molecular magnetism: from chemical design to spin control in molecules, materials and devices. *Nature Reviews Materials*, *5*(2), 87–104. <https://doi.org/10.1038/s41578-019-0146-8>

Crippa, L., Tacchino, F., Chizzini, M., Aita, A., Grossi, M., Chiesa, A., ... Carretta, S. (2021). Simulating Static and Dynamic Properties of Magnetic Molecules with Prototype Quantum Computers. *Magnetochemistry*, *7*(8), 117. <https://doi.org/10.3390/magnetochemistry7080117>

Degen, C. L., Reinhard, F., & Cappellaro, P. (2017). Quantum sensing. *Reviews of Modern Physics*, *89*(3), 035002. <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.89.035002>

DiVincenzo, D. P. (2000). The physical implementation of quantum computation. *Fortschritte Der Physik*, *48*(9–11), 771–783. [https://doi.org/10.1002/1521-3978\(200009\)48:9/11<771::AID-ROP771>3.0.CO;2-E](https://doi.org/10.1002/1521-3978(200009)48:9/11<771::AID-ROP771>3.0.CO;2-E)

Dovzhenko, Y., Casola, F., Schlotter, S., Zhou, T. X., Büttner, F., Walsworth, R. L., ... Yacoby, A. (2018). Magnetostatic twists in room-temperature skyrmions explored by nitrogen-vacancy center spin texture reconstruction. *Nature Communications*, *9*(1), 2712. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-05158-9>

Dowling, J. P., & Milburn, G. J. (2003). Quantum technology: The second quantum revolution. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, *361*(1809), 1655–1674. <https://doi.org/10.1098/rsta.2003.1227>

Fataftah, M. S., Zadrozny, J. M., Coste, S. C., Graham, M. J., Rogers, D. M., & Freedman, D. E. (2016). Employing Forbidden Transitions as Qubits in a Nuclear Spin-Free Chromium Complex. *Journal of the American Chemical Society*, *138*(4), 1344–1348. <https://doi.org/10.1021/jacs.5b11802>

Fernandez, A., Moreno Pineda, E., Muryn, C. A., Sproules, S., Moro, F., Timco, G. A., ... Winpenny, R. E. P. (2015). G-Engineering in Hybrid Rotaxanes to Create AB and AB₂ Electron Spin Systems: EPR Spectroscopic Studies of Weak Interactions between Dissimilar Electron Spin Qubits. *Angewandte Chemie - International Edition*, 54(37), 10858–10861. <https://doi.org/10.1002/anie.201504487>

Ferrando-Soria, J., Fernandez, A., Moreno Pineda, E., Varey, S. A., Adams, R. W., Vitorica-Yrezabal, I. J., ... Winpenny, R. E. P. (2015). Controlled Synthesis of Nanoscopic Metal Cages. *Journal of the American Chemical Society*, 137(24), 7644–7647. <https://doi.org/10.1021/jacs.5b04664>

Ferrando-Soria, J., Magee, S. A., Chiesa, A., Carretta, S., Santini, P., Vitorica-Yrezabal, I. J., ... Winpenny, R. E. P. (2016a). Switchable Interaction in Molecular Double Qubits. *Chem*, 1(5), 727–752. <https://doi.org/10.1016/j.chempr.2016.10.001>

Ferrando-Soria, J., Moreno Pineda, E., Chiesa, A., Fernandez, A., Magee, S. A., Carretta, S., ... Winpenny, R. E. P. (2016b). A modular design of molecular qubits to implement universal quantum gates. *Nature Communications*, 7, 11377. <https://doi.org/10.1038/ncomms11377>

Feynman, R. P. (1982). Simulating physics with computers. *International Journal of Theoretical Physics*, 21(6–7), 467–488. <https://doi.org/10.1007/BF02650179>

Gaita-Ariño, A., Luis, F., Hill, S., & Coronado, E. (2019). Molecular spins for quantum computation. *Nature Chemistry*, 11(4), 301–309. <https://doi.org/10.1038/s41557-019-0232-y>

Ganzhorn, M., Klyatskaya, S., Ruben, M., & Wernsdorfer, W. (2013). Strong spin-phonon coupling between a single-molecule magnet and a carbon nanotube nanoelectromechanical system. *Nature Nanotechnology*, 8(3), 165–169. <https://doi.org/10.1038/nnano.2012.258>

Ganzhorn, M., Klyatskaya, S., Ruben, M., & Wernsdorfer, W. (2016). Quantum Einstein-de Haas effect. *Nature Communications*, 7(1), 11443. <https://doi.org/10.1038/ncomms11443>

García-Pérez, G., Rossi, M. A. C., & Maniscalco, S. (2020). IBM Q Experience as a versatile experimental testbed for simulating open quantum systems. *Npj Quantum Information*, 6(1), 1. <https://doi.org/10.1038/s41534-019-0235-y>

Garlatti, E., Guidi, T., Ansbro, S., Santini, P., Amoretti, G., Ollivier, J., ... Carretta, S. (2017). Portraying entanglement between molecular qubits with four-dimensional inelastic neutron scattering. *Nature Communications*, 8(1), 14543. <https://doi.org/10.1038/ncomms14543>

Gatteschi, D., & Sessoli, R. (2003). Quantum tunneling of magnetization and related phenomena in molecular materials. *Angewandte Chemie - International Edition*, 42(3), 268–297. <https://doi.org/10.1002/anie.200390099>

Gedik, Z., Silva, I. A., Çakmak, B., Karpat, G., Vidoto, E. L. G., Soares-Pinto, D. O., ... Fanchini, F. F. (2015). Computational speed-up with a single qudit. *Scientific Reports*, 5(1), 14671. <https://doi.org/10.1038/srep14671>

Godfrin, C., Ferhat, A., Ballou, R., Klyatskaya, S., Ruben, M., Wernsdorfer, W., & Balestro, F. (2017). Operating Quantum States in Single Magnetic Molecules: Implementation of Grover's Quantum Algorithm. *Physical Review Letters*, 119(18), 187702. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.119.187702>

Godfrin, C., Lumetti, S., Biard, H., Bonet, E., Klyatskaya, S., Ruben, M., ... Balestro, F. (2019). Microwave-assisted reversal of a single electron spin. *Journal of Applied Physics*, 125(14). <https://doi.org/10.1063/1.5064593>

Godfrin, Clément, Ballou, R., Bonet, E., Ruben, M., Klyatskaya, S., Wernsdorfer, W., & Balestro, F. (2018). Generalized Ramsey interferometry explored with a single nuclear spin qudit. *Npj Quantum Information*, 4(1), 53. <https://doi.org/10.1038/s41534-018-0101-3>

Godfrin, Clément, Thiele, S., Ferhat, A., Klyatskaya, S., Ruben, M., Wernsdorfer, W., & Balestro, F. (2017). Electrical Read-Out of a Single Spin Using an Exchange-Coupled Quantum Dot. *ACS Nano*, 11(4), 3984–3989. <https://doi.org/10.1021/acsnano.7b00451>

Goodwin, C. A. P., Ortu, F., Reta, D., Chilton, N. F., & Mills, D. P. (2017). Molecular magnetic hysteresis at 60 kelvin in dysprosocenium. *Nature*, 548(7668), 439–442. <https://doi.org/10.1038/nature23447>

Gottesman, D. (1999). Fault-tolerant quantum computation with higher-dimensional systems. In *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)* (Vol. 1509, pp. 302–313). https://doi.org/10.1007/3-540-49208-9_27

Gould, C. A., McClain, K. R., Reta, D., Kragoskow, J. G. C., Marchiori, D. A., Lachman, E., ... Long, J. R. (2022). Ultrahard magnetism from mixed-valence dilanthanide complexes with metal-metal bonding. *Science*, 375(6577), 198–202. <https://doi.org/10.1126/science.aba15470>

Graham, M. J., Krzyaniak, M. D., Wasielewski, M. R., & Freedman, D. E. (2017). Probing Nuclear Spin Effects on Electronic Spin Coherence via EPR Measurements of Vanadium(IV) Complexes. *Inorganic Chemistry*, 56(14), 8106–8113. <https://doi.org/10.1021/acs.inorgchem.7b00794>

Graham, M. J., Zadrozny, J. M., Fataftah, M. S., & Freedman, D. E. (2017). Forging Solid-State Qubit Design Principles in a Molecular Furnace. *Chemistry of Materials*, 29(5), 1885–1897. <https://doi.org/10.1021/acs.chemmater.6b05433>

Graham, M. J., Zadrozny, J. M., Shiddiq, M., Anderson, J. S., Fataftah, M. S., Hill, S., & Freedman, D. E. (2014). Influence of electronic spin and spin-orbit coupling on decoherence in mononuclear transition metal complexes. *Journal of the American Chemical Society*, 136(21), 7623–7626. <https://doi.org/10.1021/ja5037397>

Grover, L. K. (1997). Quantum Mechanics Helps in Searching for a Needle in a Haystack. *Physical Review Letters*, 79(2), 325–328. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.79.325>

Guo, F. S., Day, B. M., Chen, Y. C., Tong, M. L., Mansikkamäki, A., & Layfield, R. A. (2018). Magnetic hysteresis up to 80 kelvin in a dysprosium metallocene single-molecule magnet. *Science*, 362(6421), 1400–1403. <https://doi.org/10.1126/science.aav0652>

Heersche, H. B., De Groot, Z., Folk, J. A., Van Der Zant, H. S. J., Romeike, C., Wegewijs, M. R., ... Cornia, A. (2006). Electron transport through single Mn₁₂ molecular magnets. *Physical Review Letters*, 96(20), 206801. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.96.206801>

Hill, S. (2003). Quantum Coherence in an Exchange-Coupled Dimer of Single-Molecule Magnets. *Science*, 302(5647), 1015–1018. <https://doi.org/10.1126/science.1090082>

Ishikawa, N., Sugita, M., Ishikawa, T., Koshihara, S. Y., & Kaizu, Y. (2003a). Lanthanide double-decker complexes functioning as magnets at the single-molecular level. *Journal of the American Chemical Society*, 125(29), 8694–8695. <https://doi.org/10.1021/ja029629n>

Ishikawa, N., Sugita, M., Okubo, T., Tanaka, N., Iino, T., & Kaizu, Y. (2003b). Determination of ligand-field parameters and f-electronic structures of double-decker bis(phthalocyaninato)lanthanide complexes. *Inorganic Chemistry*, 42(7), 2440–2446. <https://doi.org/10.1021/ic026295u>

Ishikawa, N., Sugita, M., & Wernsdorfer, W. (2005). Quantum tunneling of magnetization in lanthanide single-molecule magnets: Bis(phthalocyaninato)terbium and bis(phthalocyaninato)dysprosium anions. *Angewandte Chemie - International Edition*, 44(19), 2931–2935. <https://doi.org/10.1002/anie.200462638>

Jenkins, A., Pelliccione, M., Yu, G., Ma, X., Li, X., Wang, K. L., & Jayich, A. C. B. (2019). Single-spin sensing of domain-wall structure and dynamics in a thin-film skyrmion host. *Physical Review Materials*, 3(8), 83801. <https://doi.org/10.1103/PhysRevMaterials.3.083801>

Jenkins, M. D., Duan, Y., Diosdado, B., García-Ripoll, J. J., Gaita-Ariño, A., Giménez-Saiz, C., ... Luis, F. (2017). Coherent manipulation of three-qubit states in a molecular single-ion magnet. *Physical Review B*, 95(6), 064423. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.95.064423>

Kelly, J., Barends, R., Fowler, A. G., Megrant, A., Jeffrey, E., White, T. C., ... Martinis, J. M. (2015). State preservation by repetitive error detection in a superconducting quantum circuit. *Nature*, 519(7541), 66–69. <https://doi.org/10.1038/nature14270>

Kiktenko, E. O., Fedorov, A. K., Man'ko, O. V., & Man'ko, V. I. (2015a). Multilevel superconducting circuits as two-qubit systems: Operations, state preparation, and entropic inequalities. *Physical Review A*, *91*(4), 042312. <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.91.042312>

Kiktenko, E. O., Fedorov, A. K., Strakhov, A. A., & Man'ko, V. I. (2015b). Single qudit realization of the Deutsch algorithm using superconducting many-level quantum circuits. *Physics Letters, Section A: General, Atomic and Solid State Physics*, *379*(22–23), 1409–1413. <https://doi.org/10.1016/j.physleta.2015.03.023>

Kim, D., Ibrahim, M. I., Foy, C., Trusheim, M. E., Han, R., & Englund, D. R. (2019). A CMOS-integrated quantum sensor based on nitrogen–vacancy centres. *Nature Electronics*, *2*(7), 284–289. <https://doi.org/10.1038/s41928-019-0275-5>

Kragoskow, J. G. C., Marbey, J., Buch, C. D., Nehrkorn, J., Ozerov, M., Piligkos, S., ... Chilton, N. F. (2022). Analysis of vibronic coupling in a 4f molecular magnet with FIRMS. *Nature Communications*, *13*(1), 825. <https://doi.org/10.1038/s41467-022-28352-2>

Kues, M., Reimer, C., Roztocki, P., Cortés, L. R., Sciara, S., Wetzel, B., ... Morandotti, R. (2017). On-chip generation of high-dimensional entangled quantum states and their coherent control. *Nature*, *546*(7660), 622–626. <https://doi.org/10.1038/nature22986>

Lawrie, B. J., Lett, P. D., Marino, A. M., & Pooser, R. C. (2019). Quantum Sensing with Squeezed Light. *ACS Photonics*, *6*(6), 1307–1318. <https://doi.org/10.1021/acsp Photonics.9b00250>

Lee-Wong, E., Xue, R., Ye, F., Kreisel, A., Van Der Sar, T., Yacoby, A., & Du, C. R. (2020). Nanoscale detection of magnon excitations with variable wavevectors through a quantum spin sensor. *Nano Letters*, *20*(5), 3284–3290. <https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.0c00085>

Leuenberger, M. N., & Loss, D. (2001). Quantum computing in molecular magnets. *Nature*, *410*(6830), 789–793. <https://doi.org/10.1038/35071024>

Lloyd, S. (1993). A potentially realizable quantum computer. *Science*, *261*(5128), 1569–1571. <https://doi.org/10.1126/science.261.5128.1569>

Lockyer, S. J., Chiesa, A., Timco, G. A., McInnes, E. J. L., Bennett, T. S., Vitorica-Yrezabal, I. J., ... Winpenny, R. E. P. (2021). Targeting molecular quantum memory with embedded error correction. *Chemical Science*, 12(26), 9104–9113. <https://doi.org/10.1039/d1sc01506k>

Lorusso, G., Troiani, F., Bellini, V., Ghirri, A., Candini, A., Carretta, S., ... Affronte, M. (2011). Spin entanglement in supramolecular systems. *Journal of Physics: Conference Series*, 303(1), 012033. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/303/1/012033>

Lovchinsky, I., Sushkov, A. O., Urbach, E., de Leon, N. P., Choi, S., De Greve, K., ... Lukin, M. D. (2016). Nuclear magnetic resonance detection and spectroscopy of single proteins using quantum logic. *Science*, 351(6275), 836–841. <https://doi.org/10.1126/science.aad8022>

Luis, F., Repollés, A., Martínez-Pérez, M. J., Aguilà, D., Roubeau, O., Zueco, D., ... Aromí, G. (2011). Molecular prototypes for spin-based CNOT and SWAP quantum gates. *Physical Review Letters*, 107(11), 117203. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.107.117203>

Luo, M., & Wang, X. (2014). Universal quantum computation with qudits. *Science China: Physics, Mechanics and Astronomy*, 57(9), 1712–1717. <https://doi.org/10.1007/s11433-014-5551-9>

Macaluso, E., Rubín, M., Aguilà, D., Chiesa, A., Barrios, L. A., Martínez, J. I., ... Carretta, S. (2020). A heterometallic [LnLn'Ln] lanthanide complex as a qubit with embedded quantum error correction. *Chemical Science*, 11(38), 10337–10343. <https://doi.org/10.1039/D0SC03107K>

Martínez-Pérez, M. J., Cardona-Serra, S., Schlegel, C., Moro, F., Alonso, P. J., Prima-García, H., ... Luis, F. (2012). Gd-based single-ion magnets with tunable magnetic anisotropy: Molecular design of spin qubits. *Physical Review Letters*, 108(24), 247213. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.108.247213>

Milburn, G. J. (2009). Photons as qubits. *Physica Scripta T*, T137, 014003. <https://doi.org/10.1088/0031-8949/2009/T137/014003>

Mirzoyan, R., & Hadt, R. G. (2020). The dynamic ligand field of a molecular qubit: Decoherence through spin-phonon coupling. *Physical*

Chemistry Chemical Physics, 22(20), 11249–11265.
<https://doi.org/10.1039/d0cp00852d>

Mohammadi, M., Niknafs, A., & Eshghi, M. (2011). Controlled gates for multi-level quantum computation. *Quantum Information Processing*, 10(2), 241–256. <https://doi.org/10.1007/s11128-010-0192-z>

Molina-Jirón, C., Chellali, M. R., Kumar, C. N. S., Kübel, C., Velasco, L., Hahn, H., ... Ruben, M. (2019). Direct Conversion of CO₂ to Multi-Layer Graphene using Cu–Pd Alloys. *ChemSusChem*, 12(15), 3509–3514. <https://doi.org/10.1002/cssc.201901404>

Montanaro, A. (2016). Quantum algorithms: An overview. *Npj Quantum Information*, 2(1), 15023. <https://doi.org/10.1038/npjqi.2015.23>

Moreno-Pineda, E., Damjanović, M., Fuhr, O., Wernsdorfer, W., & Ruben, M. (2017). Nuclear Spin Isomers: Engineering a Et₄N[DyPc₂] Spin Qudit. *Angewandte Chemie - International Edition*, 56(33), 9915–9919. <https://doi.org/10.1002/anie.201706181>

Moreno-Pineda, E., Godfrin, C., Balestro, F., Wernsdorfer, W., & Ruben, M. (2018). Molecular spin qudits for quantum algorithms. *Chemical Society Reviews*, 47(2), 501–513. <https://doi.org/10.1039/c5cs00933b>

Moreno-Pineda, E., Klyatskaya, S., Du, P., Damjanović, M., Taran, G., Wernsdorfer, W., & Ruben, M. (2018). Observation of Cooperative Electronic Quantum Tunneling: Increasing Accessible Nuclear States in a Molecular Qudit. *Inorganic Chemistry*, 57(16), 9873–9879. <https://doi.org/10.1021/acs.inorgchem.8b00823>

Moreno-Pineda, E., & Wernsdorfer, W. (2021). Measuring molecular magnets for quantum technologies. *Nature Reviews Physics*, 3(9), 645–659. <https://doi.org/10.1038/s42254-021-00340-3>

Moreno Pineda, E., Komeda, T., Katoh, K., Yamashita, M., & Ruben, M. (2016). Surface confinement of TbPc₂-SMMs: structural, electronic and magnetic properties. *Dalton Transactions*, 45(46), 18417–18433. <https://doi.org/10.1039/c6dt03298b>

Morley, G. W. (2014). Chapter 3. Towards spintronic quantum technologies with dopants in silicon (pp. 62–76). <https://doi.org/10.1039/9781782620280-00062>

Nakazawa, S., Nishida, S., Ise, T., Yoshino, T., Mori, N., Rahimi, R. D., ... Takui, T. (2012). A synthetic two-spin quantum bit: G-engineered exchange-coupled biradical designed for controlled-NOT gate operations. *Angewandte Chemie - International Edition*, 51(39), 9860–9864. <https://doi.org/10.1002/anie.201204489>

Neeley, M., Ansmann, M., Bialczak, R. C., Hofheinz, M., Lucero, E., O’Connell, A. D., ... Martinis, J. M. (2009). Emulation of a quantum spin with a superconducting phase qudit. *Science*, 325(5941), 722–725. <https://doi.org/10.1126/science.1173440>

Neves, L., Lima, G., Gómez, J. G. A., Monken, C. H., Saavedra, C., & Pádua, S. (2005). Generation of entangled states of qudits using twin photons. *Physical Review Letters*, 94(10), 100501. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.94.100501>

Nielsen, M. A., & Chuang, I. L. (2012). *Quantum Computation and Quantum Information*. Cambridge University Press, Cambridge Physics, Englad. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511976667>

Nossa, J. F., Islam, M. F., Canali, C. M., & Pederson, M. R. (2013). Electric control of a {Fe4} single-molecule magnet in a single-electron transistor. *Physical Review B - Condensed Matter and Materials Physics*, 88(22), 224423. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.88.224423>

Novoselov, K. S., Geim, A. K., Morozov, S. V., Jiang, D., Zhang, Y., Dubonos, S. V., ... Firsov, A. A. (2004). Electric Field Effect in Atomically Thin Carbon Films. *Science*, 306(5696), 666–669. <https://doi.org/10.1126/science.1102896>

O’Leary, D. P., Brennen, G. K., & Bullock, S. S. (2006). Parallelism for quantum computation with qudits. *Physical Review A - Atomic, Molecular, and Optical Physics*, 74(3), 032334. <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.74.032334>

Ohshima, T., Satoh, T., Kraus, H., Astakhov, G. V., Dyakonov, V., & Baranov, P. G. (2018). Creation of silicon vacancy in silicon carbide by proton beam writing toward quantum sensing applications. *J. Phys. D: Appl. Phys.* 51(33). <https://doi.org/10.1088/1361-6463/aad0ec>

Otterbach, J. S., Manenti, R., Alidoust, N., Bestwick, A., Block, M., Bloom, B., ... Rigetti, C. (2017). Unsupervised Machine Learning on a Hybrid Quantum Computer. *arXiv:1712.05771*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1712.05771>

Panajotov, K. P., Arizaleta, M., Gomez, V., Koltys, K., Tabaka, A., Sciamanna, M., ... Thienpont, H. (2004). Semiconductor lasers for quantum sensing. In *Proceedings Quantum Sensing and Nanophotonic Devices*, 5359(360). <https://doi.org/10.1117/12.518317>

Pedersen, K. S., Ariciu, A. M., McAdams, S., Weihe, H., Bendix, J., Tuna, F., & Piligkos, S. (2016). Toward molecular 4f single-ion magnet qubits. *Journal of the American Chemical Society*, 138(18), 5801–5804. <https://doi.org/10.1021/jacs.6b02702>

Popov, A., Kiktenko, E., Fedorov, A., & Man'ko, V. I. (2016). Information Processing Using Three-Qubit and Qubit–Qutrit Encodings of Noncomposite Quantum Systems. *Journal of Russian Laser Research*, 37(6), 581–590. <https://doi.org/10.1007/s10946-016-9610-8>

Radu, V., Price, J. C., Levett, S. J., Narayanasamy, K. K., Bateman-Price, T. D., Wilson, P. B., & Mather, M. L. (2020). Dynamic Quantum Sensing of Paramagnetic Species Using Nitrogen-Vacancy Centers in Diamond. *ACS Sensors*, 5(3), 703–710. <https://doi.org/10.1021/acssensors.9b01903>

Ralph, T. C., Resch, K. J., & Gilchrist, A. (2007). Efficient Toffoli gates using qudits. *Physical Review A - Atomic, Molecular, and Optical Physics*, 75(2), 022313. <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.75.022313>

Richart, D., Fischer, Y., & Weinfurter, H. (2012). Experimental implementation of higher dimensional time-energy entanglement. *Applied Physics B: Lasers and Optics*, 106(3), 543–550. <https://doi.org/10.1007/s00340-011-4854-z>

- Rungta, P., Munro, W. J., Nemoto, K., Deuar, P., Milburn, G. J., & Caves, C. M. (2007). Qudit Entanglement. *Directions in Quantum Optics*, (1), 149–164. https://doi.org/10.1007/3-540-40894-0_14
- Sangregorio, C., Ohm, T., Paulsen, C., Sessoli, R., & Gatteschi, D. (1997). Quantum Tunneling of the Magnetization in an Iron Cluster Nanomagnet. *Physical Review Letters*, 78(24), 4645–4648. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.78.4645>
- Santanni, F., Albino, A., Atzori, M., Ranieri, D., Salvadori, E., Chiesa, M., ... Sessoli, R. (2021). Probing Vibrational Symmetry Effects and Nuclear Spin Economy Principles in Molecular Spin Qubits. *Inorg. Chem.*, 60(1), 140–151. <https://doi.org/10.1021/acs.inorgchem.0c02573>
- Schrödinger, E. (1926). Quantisierung als Eigenwertproblem. *Annalen Der Physik*, 385(13), 437–490. <https://doi.org/10.1002/andp.19263851302>
- Sessoli, R., Gatteschi, D., Caneschi, A., & Novak, M. A. (1993). Magnetic bistability in a metal-ion cluster. *Nature*, 365(6442), 141–143. <https://doi.org/10.1038/365141a0>
- Shi, F., Zhang, Q., Wang, P., Sun, H., Wang, J., Rong, X., ... Du, J. (2015). Single-protein spin resonance spectroscopy under ambient conditions. *Science*, 347(6226), 1135–1138. <https://www.science.org/doi/10.1126/science.aaa2253>
- Shiddiq, M., Komijani, D., Duan, Y., Gaita-Ariño, A., Coronado, E., & Hill, S. (2016). Enhancing coherence in molecular spin qubits via atomic clock transitions. *Nature*, 531(7594), 348–351. <https://doi.org/10.1038/nature16984>
- Shor, P. W. (1997). Polynomial-time algorithms for prime factorization and discrete logarithms on a quantum computer. *SIAM Journal on Computing*, 26(5), 1484–1509. <https://doi.org/10.1137/S0097539795293172>
- Stepanenko, D., Trif, M., & Loss, D. (2008). Quantum computing with molecular magnets. *Inorganica Chimica Acta*, 361(14–15), 3740–3745. <https://doi.org/10.1016/j.ica.2008.02.066>

Sugisaki, K., Nakazawa, S., Toyota, K., Sato, K., Shiomi, D., & Takui, T. (2019). Quantum chemistry on quantum computers: Quantum simulations of the time evolution of wave functions under the S 2 operator and determination of the spin quantum number: *S. Phys. Chem. Chem. Phys.*, *21*(28), 15356–15361. <https://doi.org/10.1039/c9cp02546d>

Sun, Y., & Rogers, J. A. (2007). Inorganic semiconductors for flexible electronics. *Advanced Materials*, *19*(15), 1897–1916. <https://doi.org/10.1002/adma.200602223>

Tacchino, F., Chiesa, A., Sessoli, R., Tavernelli, I., & Carretta, S. (2021). A proposal for using molecular spin qubits as quantum simulators of light-matter interactions. *Journal of Materials Chemistry C*, *9*(32), 10266–10275. <https://doi.org/10.1039/d1tc00851j>

Taran, G., Bonet, E., & Wernsdorfer, W. (2019). The role of the quadrupolar interaction in the tunneling dynamics of lanthanide molecular magnets. *Journal of Applied Physics*, *125*(14), 142903. <https://doi.org/10.1063/1.5079453>

Tesi, L., Lucaccini, E., Cimatti, I., Perfetti, M., Mannini, M., Atzori, M., ... Sessoli, R. (2016). Quantum coherence in a processable vanadyl complex: New tools for the search of molecular spin qubits. *Chemical Science*, *7*(3), 2074–2083. <https://doi.org/10.1039/c5sc04295j>

Thiele, S., Vincent, R., Holzmann, M., Klyatskaya, S., Ruben, M., Balestro, F., & Wernsdorfer, W. (2013). Electrical readout of individual nuclear spin trajectories in a single-molecule magnet spin transistor. *Physical Review Letters*, *111*(3), 037203. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.111.037203>

Thiele, Stefan, Balestro, F., Ballou, R., Klyatskaya, S., Ruben, M., & Wernsdorfer, W. (2014). Electrically driven nuclear spin resonance in single-molecule magnets. *Science*, *344*(6188), 1135–1138. <https://doi.org/10.1126/science.1249802>

Thomas, L., Lioni, F., Ballou, R., Gatteschi, D., Sessoli, R., & Barbara, B. (1996). Macroscopic quantum tunnelling of magnetization in a single crystal of nanomagnets. *Nature*, *383*(6596), 145–147. <https://doi.org/10.1038/383145a0>

Timco, G. A., Carretta, S., Troiani, F., Tuna, F., Pritchard, R. J., Muryn, C. A., ... Winpenny, R. E. P. (2009). Engineering the coupling between molecular spin qubits by coordination chemistry. *Nature Nanotechnology*, 4(3), 173–178. <https://doi.org/10.1038/nnano.2008.404>

Troiani, F., Carretta, S., & Santini, P. (2013). Detection of entanglement between collective spins. *Physical Review B - Condensed Matter and Materials Physics*, 88(19), 195421. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.88.195421>

Troiani, F., Ghirri, A., Affronte, M., Carretta, S., Santini, P., Amoretti, G., ... Winpenny, R. E. P. (2005). Molecular engineering of antiferromagnetic rings for quantum computation. *Physical Review Letters*, 94(20), 207208. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.94.207208>

Troiani, F., Ghirri, A., Paris, M. G. A., Bonizzoni, C., & Affronte, M. (2019). Towards quantum sensing with molecular spins. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 491, 165534. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2019.165534>

Urdampilleta, M., Klyatskaya, S., Cleuziou, J. P., Ruben, M., & Wernsdorfer, W. (2011). Supramolecular spin valves. *Nature Materials*, 10(7), 502–506. <https://doi.org/10.1038/nmat3050>

Urdampilleta, M., Klyatskaya, S., Ruben, M., & Wernsdorfer, W. (2013). Landau-Zener tunneling of a single Tb³⁺ magnetic moment allowing the electronic read-out of a nuclear spin. *Physical Review B*, 87(19), 195412. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.87.195412>

Urdampilleta, M., Klyatskaya, S., Ruben, M., & Wernsdorfer, W. (2015). Magnetic interaction between a radical spin and a single-molecule magnet in a molecular spin-valve. *ACS Nano*, 9(4), 4458–4464. <https://doi.org/10.1021/acs.nano.5b01056>

Vincent, R., Klyatskaya, S., Ruben, M., Wernsdorfer, W., & Balestro, F. (2012). Electronic read-out of a single nuclear spin using a molecular spin transistor. *Nature*, 488(7411), 357–360. <https://doi.org/10.1038/nature11341>

Wasielowski, M. R., Forbes, M. D. E., Frank, N. L., Kowalski, K., Scholes, G. D., Yuen-Zhou, J., ... Whaley, K. B. (2020). Exploiting chemistry and molecular systems for quantum information science. *Nature Reviews Chemistry*, 4(9), 490–504. <https://doi.org/10.1038/s41570-020-0200-5>

Watson, T. F., Philips, S. G. J., Kawakami, E., Ward, D. R., Scarlino, P., Veldhorst, M., ... Vandersypen, L. M. K. (2018). A programmable two-qubit quantum processor in silicon. *Nature*, 555(7698), 633–637. <https://doi.org/10.1038/nature25766>

Wedge, C. J., Timco, G. A., Spielberg, E. T., George, R. E., Tuna, F., Rigby, S., ... Ardavan, A. (2012). Chemical Engineering of Molecular Qubits. *Physical Review Letters*, 108(10), 107204. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.108.107204>

Wernsdorfer, W., Soler, M., Christou, G., & Hendrickson, D. N. (2002). Quantum phase interference (Berry phase) in single-molecule magnets of [Mn12]2-. *Journal of Applied Physics*, 91(10 I), 7164–7166. <https://doi.org/10.1063/1.1450788>

Wiesendanger, R., Güntherodt, H. J., Güntherodt, G., Gambino, R. J., & Ruf, R. (1990). Observation of vacuum tunneling of spin-polarized electrons with the scanning tunneling microscope. *Physical Review Letters*, 65(2), 247–250. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.65.247>

Wiesendanger, Roland. (2009). Spin mapping at the nanoscale and atomic scale. *Reviews of Modern Physics*, 81(4), 1495–1550. <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.81.1495>

Willke, P., Bae, Y., Yang, K., Lado, J. L., Ferrón, A., Choi, T., ... Lutz, C. P. (2018). Hyperfine interaction of individual atoms on a surface. *Science*, 362(6412), 336–339. <https://doi.org/10.1126/science.aat7047>

Willke, P., Paul, W., Natterer, F. D., Yang, K., Bae, Y., Choi, T., ... Lutz, C. P. (2018). Probing quantum coherence in single-atom electron spin resonance. *Science Advances*, 4(2), eaq1543. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aq1543>

Willke, P., Singha, A., Zhang, X., Esat, T., Lutz, C. P., Heinrich, A. J., & Choi, T. (2019a). Tuning Single-Atom Electron Spin Resonance in a Vector Magnetic Field. *Nano Letters*, *19*(11), 8201–8206. <https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.9b03559>

Willke, P., Yang, K., Bae, Y., Heinrich, A. J., & Lutz, C. P. (2019b).

Magnetic resonance imaging of single atoms on a surface. *Nature Physics*, *15*(10), 1005–1010. <https://doi.org/10.1038/s41567-019-0573-x>

Xiang, Q., Cheng, B., & Yu, J. (2015). Graphene-Based Photocatalysts for Solar-Fuel Generation. *Angewandte Chemie - International Edition*, *54*(39), 11350–11366. <https://doi.org/10.1002/anie.201411096>

Yang, J., Wang, Y., Wang, Z., Rong, X., Duan, C. K., Su, J. H., & Du, J. (2012). Observing quantum oscillation of ground states in single molecular magnet. *Physical Review Letters*, *108*(23), 230501. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.108.230501>

Yang, K., Bae, Y., Paul, W., Natterer, F. D., Willke, P., Lado, J. L., ... Lutz, C. P. (2017). Engineering the Eigenstates of Coupled Spin- 1/2 Atoms on a Surface. *Physical Review Letters*, *119*(22), 227206. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.119.227206>

Yang, K., Paul, W., Phark, S. H., Willke, P., Bae, Y., Choi, T., ... Lutz, C. P. (2019). Coherent spin manipulation of individual atoms on a surface. *Science*, *366*(6464), 509–512. <https://doi.org/10.1126/science.aay6779>

Yu, C. J., Graham, M. J., Zadrozny, J. M., Niklas, J., Krzyaniak, M. D., Wasielewski, M. R., ... Freedman, D. E. (2016). Long Coherence Times in Nuclear Spin-Free Vanadyl Qubits. *Journal of the American Chemical Society*, *138*(44), 14678–14685. <https://doi.org/10.1021/jacs.6b08467>

Yu, C. J., Von Kugelgen, S., Laorenza, D. W., & Freedman, D. E. (2021). A Molecular Approach to Quantum Sensing. *ACS Central Science*, *7*(5), 712–723. <https://doi.org/10.1021/acscentsci.0c00737>

Zadrozny, J. M., Niklas, J., Poluektov, O. G., & Freedman, D. E. (2014). Multiple quantum coherences from hyperfine transitions in a vanadium(IV) complex. *Journal of the American Chemical Society*, *136*(45), 15841–15844. <https://doi.org/10.1021/ja507846k>

Zadrozny, J. M., Niklas, J., Poluektov, O. G., & Freedman, D. E. (2015). Millisecond coherence time in a tunable molecular electronic spin qubit. *ACS Central Science*, *1*(9), 488–492. <https://doi.org/10.1021/acscentsci.5b00338>

Zhang, Y., Zhang, L., & Zhou, C. (2013). Review of chemical vapor deposition of graphene and related applications. *Accounts of Chemical Research*, *46*(10), 2329–2339. <https://doi.org/10.1021/ar300203n>



MASERS AS TRACERS OF ANGULAR MOMENTUM IN MOLECULAR OUTFLOWS

Diana V. López N.¹, Esteban D. Araya²

¹Universidad de Panamá, Escuela de Física, Facultad de Ciencias Naturales, Exactas y Tecnología, Panamá. dianavlopezn@gmail.com 

²Western Illinois University, Physics Department, United States. ed-araya@wiu.edu



Fecha de recepción: 22 de septiembre de 2022

Fecha de aceptación: 8 de noviembre de 2022

ABSTRACT

The dissipation of angular momentum of collapsing molecular cores is a key component in the formation of stars. Previous observations have reported that highly collimated protostellar jets can remove angular momentum from low-mass protostars. In contrast, there is no clear evidence that this occurs for high-mass protostars. Here we report the results of developing a data analysis platform to investigate whether molecular masers in the outflows of two high-mass star forming regions, DR21(OH) and W75N(B), trace net angular momentum. No statistically significant evidence was found for masers to trace net angular momentum transfer in these regions. However, our results show that high-angular resolution observations of masers near high-mass protostars have the potential of revealing this phenomenon at scales similar to the specific angular momentum carried by planets in our Solar System.

KEYWORDS

Astrophysics, radio astronomy, high-mass stars, formation of stars, masers.

MÁSERES COMO TRAZADORES DE MOMENTO ANGULAR EN FLUJOS MOLECULARES

RESUMEN

La disipación del momento angular en los núcleos pre-estelares es un componente clave en la formación de las estrellas. Observaciones previas han detectado chorros proto-estelares altamente colimados como los responsables de parte de la remoción del momento angular en protoestrellas de baja masa. En cambio, no se ha encontrado evidencia significativa de que esto ocurra para las protoestrellas de alta masa. En este estudio reportamos los resultados de desarrollar una plataforma de análisis de datos dedicada a investigar si máseres en los flujos moleculares de dos regiones de formación de estrellas masivas, DR21(OH) y W75N(B), son capaces de trazar momento angular neto. Estadísticamente no se detectó evidencia significativa de transferencia de momento angular en las regiones estudiadas. Sin embargo, los resultados muestran que observaciones de alta resolución de máseres cercanos a las protoestrellas de alta masa tienen el potencial de revelar la naturaleza de este fenómeno a escalas similares a las del momento angular específico que portan los planetas de nuestro Sistema Solar.

PALABRAS CLAVES

Astrofísica, radioastronomía, estrellas masivas, formación estelar, máseres.

INTRODUCTION

Recent evolutionary models of high-mass star formation, i.e., stars with 8 or more times the mass of the Sun, describe how these objects form in molecular clouds of gas and dust (e.g., see review by Motte et al., 2018). Inside molecular clouds complexes at parsec scales, there are sites called ridges and hubs, in which massive dense cores start to form. Kinematic studies of molecular gas tracers suggest that global collapse conditions can be present in the ridges through flow streams, which increase the mass of the dense cores, leading to the formation of high-mass protostars. The inflowing gas streams lead to high accretion rates, which in turn result in the development hot molecular cores and molecular outflows. To form a star, of the material must collapse, which is possible only if angular momentum is somehow dissipated.

According to theoretical models and recent observations of low mass protostellar jets (e.g., Lee et al., 2017), molecular outflows can remove

angular momentum from circumstellar disks, allowing material to fall onto the central young stellar object. In contrast, there is no clear evidence that this occurs for high-mass protostars. Massive stars play a significant role in galactic dynamics; from birth to death, massive stars contribute to the energetics of galaxies via stellar winds, radiation, supernovae, etc. Hence, it is important to understand the mechanisms involved in their formation.

Masers (*Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation*) from different molecular species and transitions have been a very useful tool to study molecular outflows. Some maser species, such as transitions from methanol (CH_3OH), water (H_2O) and other molecules, are known tracers (indicators) of regions of massive star formation (e.g., Paulson & Pandian 2020; Torrelles et al. 1997; Araya et al. 2015). Radiation and shocks in jets and outflows from young high-mass stellar objects can excite molecules resulting in population inversion, whose stimulated de-excitation (in a cascade) produce narrow bandwidth (monochromatic) and high brightness-temperature spectral lines, which can be used to trace gas kinematics in star forming regions at sub-arcsecond resolutions. The maser phenomenon is like that of lasers, but for long wavelength radiation (radio/microwaves) instead of visible light (e.g., Saldaño, 2016).

In this project we developed a data analysis platform to investigate whether masers in molecular outflows of massive protostars can trace dissipation of angular momentum. We focused on the analysis of two regions of high-mass star formation, DR21(OH) and W75N(B), which belong to the Cygnus X complex. DR21(OH) is in an early phase of evolution, in which massive protostars have not yet substantially ionized the surrounding molecular gas (e.g., Araya et al. 2009). Observations by Kogan & Slysh (1998), which were confirmed by Kurtz et al. (2004) and Araya et al. (2009), reveal a bipolar structure of CH_3OH masers consistent with a molecular outflow. Similarly, W75N(B) harbors stellar objects in very early phases of high-mass star formation, as revealed by an ionized jet and molecular masers (e.g., Carrasco-González et al. 2015). Haschick et al. (1981) proposed that W75N(B) is excited by a binary system of massive stars (B1 type) in formation. Observations of OH masers by Baart et al. (1986) using the Multi-Element Radio Linked Interferometer Network (MERLIN) supported a scenario in which the OH and H_2O masers are tracing an outflow in this region.

MATERIALS AND METHODS

A Jupyter notebook was developed in the Python programming language, the code was designed to read ASCII files of Right Ascension (RA) and Declination (Dec) positions, as well as observed velocities of masers in molecular outflows in two high-mass star forming regions. Our approach uses the offset positions of the masers with respect to the approximate geometrical center of the outflow (the expected location of the high mass protostellar object), the approximate direction of the molecular outflow, and the velocity field of the masers to estimate the projected specific angular momentum.

1. Star Forming Regions Studied

The distribution of thirty-seven 44 GHz CH₃OH masers in the DR21(OH) region was analyzed. The data were extracted from Araya et al. (2009). The masers reported in DR21(OH) appear to trace a sequence of bow shocks in four arc-like structures, as it is shown in Figure 1. The morphology of the CH₃OH masers shows two arcs oriented to the east (blueshifted) and two apparent arcs oriented to the west (redshifted). Araya et al. (2009) suggested that the distribution is like a jet bow-shock outflow produced by a protostar. This hypothesis is supported by the detection of a continuum source located close to the center of the CH₃OH maser outflow. The angular resolution of these observations is approximately 0.92 arcsec.

High-resolution data reported in Torrelles et al. (1997) of the region W75N(B) was also analyzed. In this region, we focused on two sources with 22 GHz H₂O masers: VLA 1 with 11 H₂O masers shown in Figure 2, and VLA 2 with 9 H₂O masers shown in Figure 3.

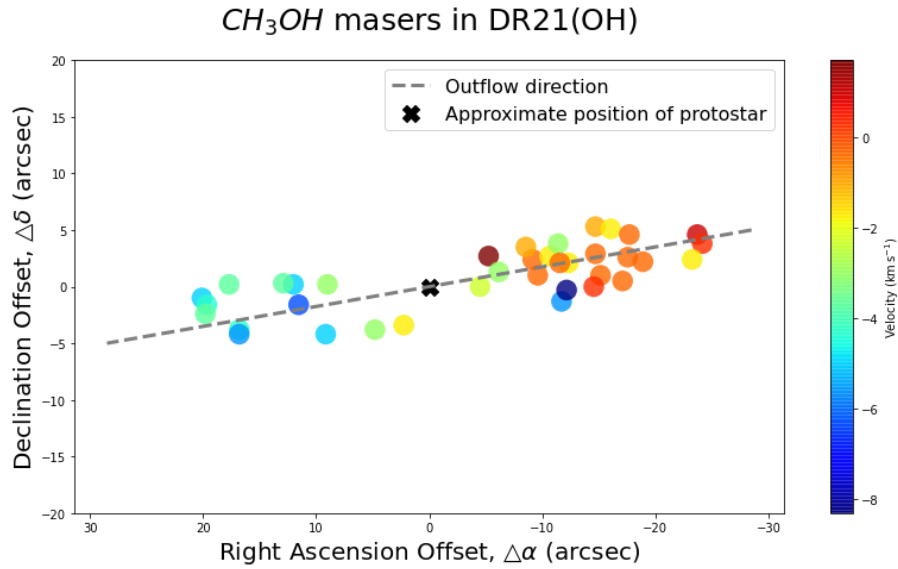


Fig 1. LSR velocity field of 44 GHz CH_3OH masers in the DR21(OH) region. The dashed line corresponds to the approximate outflow direction. The cross shows the assumed position of the outflow's origin based on the spatial and kinematic distribution of the masers.

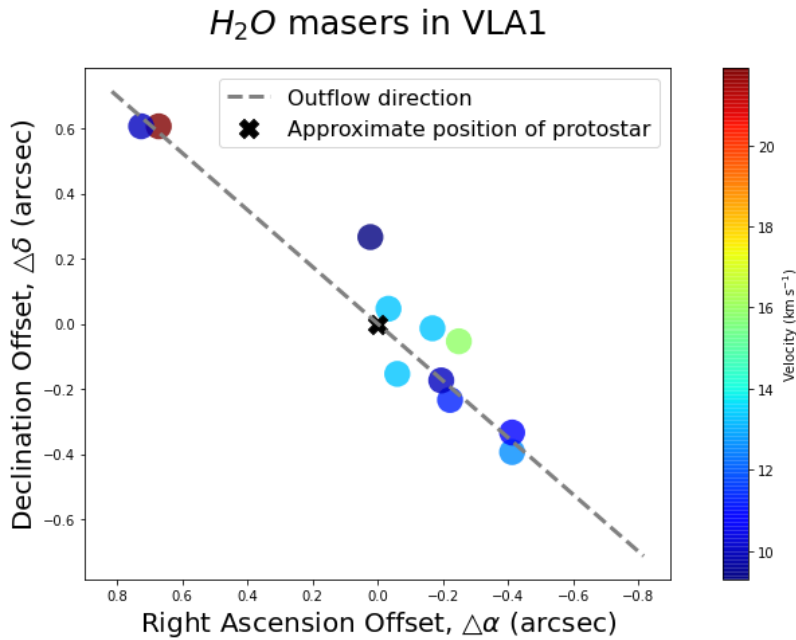


Fig. 2 As Figure 1 but for H_2O masers in WN75(B) VLA 1.

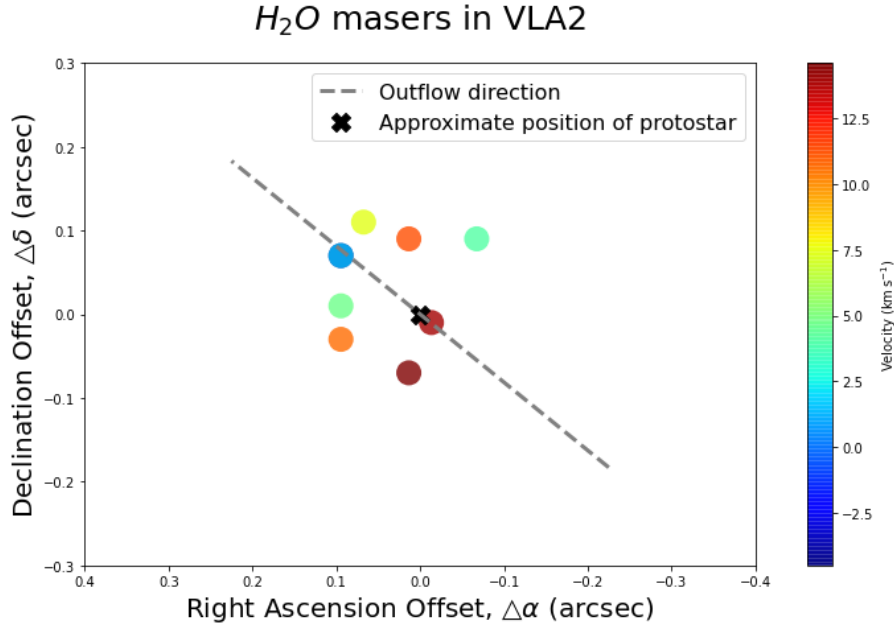


Fig. 3 As Figure 1 but for H₂O masers in WN75(B) VLA 2.

In contrast to DR21(OH), the distribution of masers in VLA 1 did not trace arc-like structures. However, as Torrelles et al. (1997) pointed out, the elongated emission of VLA 1 resembles that of the radio jets found in young stellar objects. For VLA 2, the masers trace a more compact shell distribution. The relative astrometry of the masers is 0.01 arcsec for the Torrelles et al. (1997) data.

2. Projected Specific Angular Momentum

The distribution of masers in the sky traces a two-dimensional projection of a three-dimensional structure. Our model was developed using Euclidean geometry to estimate the relative distances of the masers and direction of the outflows with respect to the geometric and kinematic center of the flows. Figure 4 shows a diagram of the vectors used in the analysis of the sources. The vector \vec{r} represents the position of each maser with respect to the assumed position of the protostar:

$$\vec{r} = \vec{r}_{maser} - \vec{r}_{protostar} \quad (1)$$

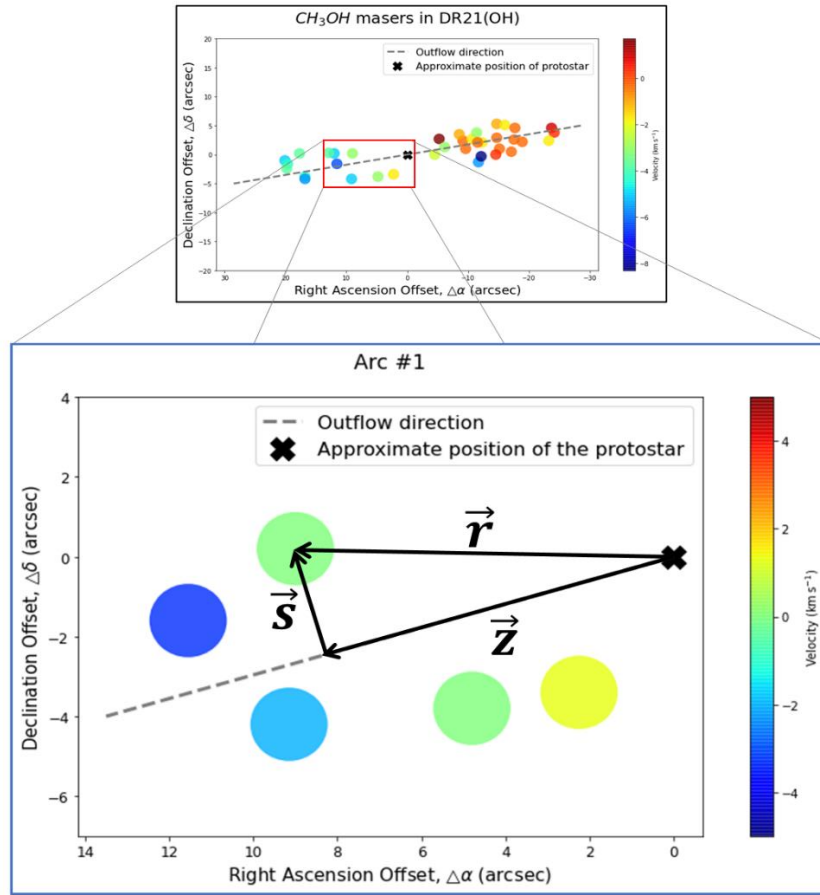


Fig. 4 Vectors used in the analysis of DR21(OH). A similar approach was used for the region W75N(B). The zoom-in view (blue rectangle) includes only the masers that were assigned to the first bow shock (Arc #1). Based on the symmetry of the arc structures, some of the masers toward the North-East of the inset box (red rectangle) appear to be associated with a different maser arc, and therefore, were not included in the blue zoom-in view.

The outflow direction is considered as the axis of rotation. The vector \vec{s} represents the perpendicular distance between each maser and the outflow direction. The vector \vec{z} represents the position of each maser projected onto the outflow axis:

$$\vec{z} = \vec{r} - \vec{s} \quad (2)$$

The mass of the maser clouds is unknown and hence we calculated the projected specific angular momentum as a function of \vec{z} . In our approach, the projected specific angular momentum is defined as:

$$\vec{l} = \frac{\vec{L}}{m} = \vec{s} \times \vec{v} \quad (3)$$

In which the vector \vec{v} refers to the velocity of the maser in the protostar's reference frame corrected for the outflow's expansion. However, the observed maser velocities correspond to the Local Standard of Rest (LSR) projections in our line-of-sight. Consequently, we had to correct for 1) the systemic velocity shift of the maser velocities due to the relative motion of the Solar System and each star forming region, and 2) the velocity gradient of the masers caused by the projected outflow motion (which does not trace angular momentum but the expansion of the molecular gas along the outflow's axis). To correct for both effects, we calculated a reference velocity function based on a linear regression (Least Square method) of the observed maser velocities along the outflow's axis, such that both the systemic velocity and the velocity gradient due to the outflow motion could be corrected. In our model, the reference velocity is a function of the vector \vec{z} ; the reference velocity for each maser was subtracted from the observed LSR velocities to estimate the value of \vec{v} that was used in the specific angular momentum calculation.

RESULTS AND DISCUSSION

A non-zero average of the projected specific angular momentum of the maser distribution would indicate the detection of net angular momentum in the outflows (the sign of the non-zero average would indicate the direction of the angular momentum with respect to \vec{z}). Figure 5 shows the results for DR21(OH). For this source, we obtained an averaged projected specific angular momentum of 1.8×10^3 AU km/s, that is greater than the projected specific angular momentum of the planets in the Solar System (between 20 and 1.7×10^2 AU km/s, star symbol in Figure 5), but smaller than the standard deviation (σ) of the data (7.8×10^3 AU km/s). Therefore, no significant net angular momentum is traced by the 44 GHz CH₃OH masers in DR21(OH).

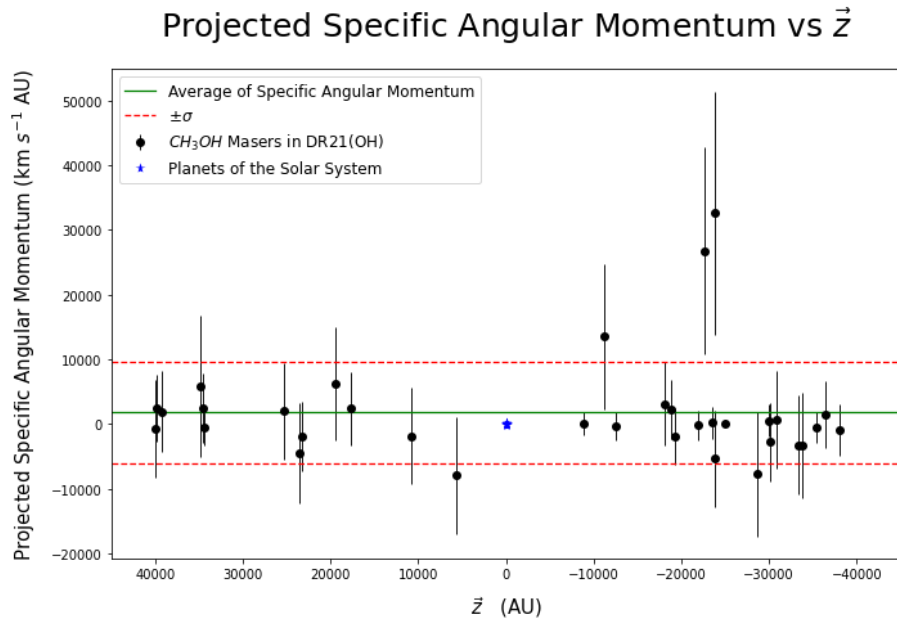


Fig. 5 Projected specific angular momentum vs \bar{z} in DR21(OH). The green line represents the average specific angular momentum of all masers in the sample, and the dashed red lines show one standard deviation dispersion with respect to the mean. For comparison, blue stars are included to show the specific angular momentum of the planets of the Solar System (all stars are blended in this graph).

For the sources VLA 1 and VLA 2, we obtained an averaged projected specific angular momentum of -17 AU km/s and $-1.1 \times 10^2 \text{ AU km/s}$, respectively. Both results are smaller than the standard deviation of the data. The standard deviation for VLA 1 is $5.6 \times 10^2 \text{ AU km/s}$ and $6.3 \times 10^2 \text{ AU km/s}$ for VLA 2. As shown in Figures 6 and 7, we report no significant net angular momentum traced by H_2O masers in W75N(B) VLA 1 and VLA 2 within the standard deviation of the specific angular momentum in the samples. However, due to the high angular resolution of the data (where the masers are tracing the inner regions of the outflows) the dispersion of the specific angular momentum is smaller than the one observed toward DR21(OH) and approaches the values of specific angular momentum of the planets in our Solar System.

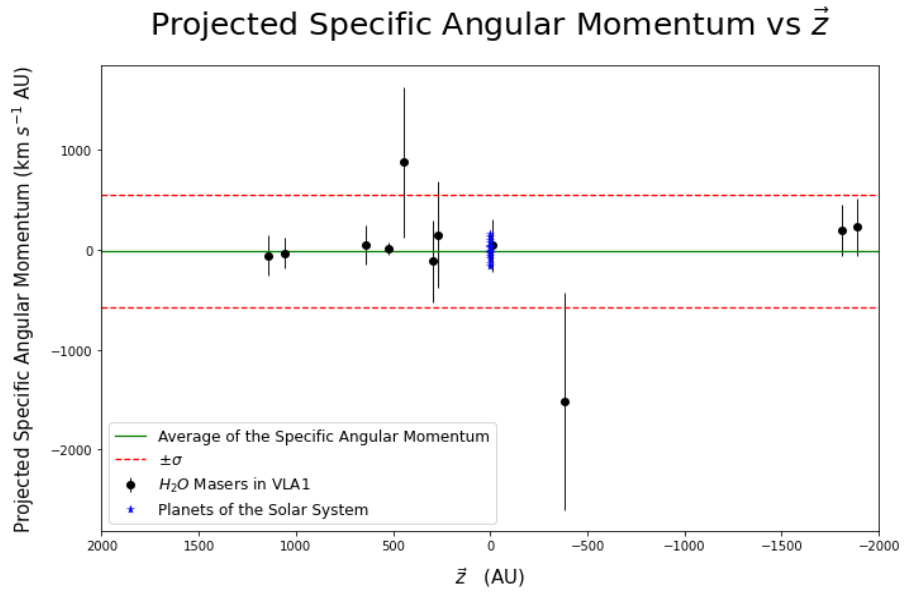


Fig. 6 As Figure 5 but for W75N(B) VLA 1. The blue stars represent the specific angular momentum of the planets of the Solar System, which in Figure 5 appeared as a single star due to the large dispersion of specific angular momentum of the 44 GHz CH_3OH masers.

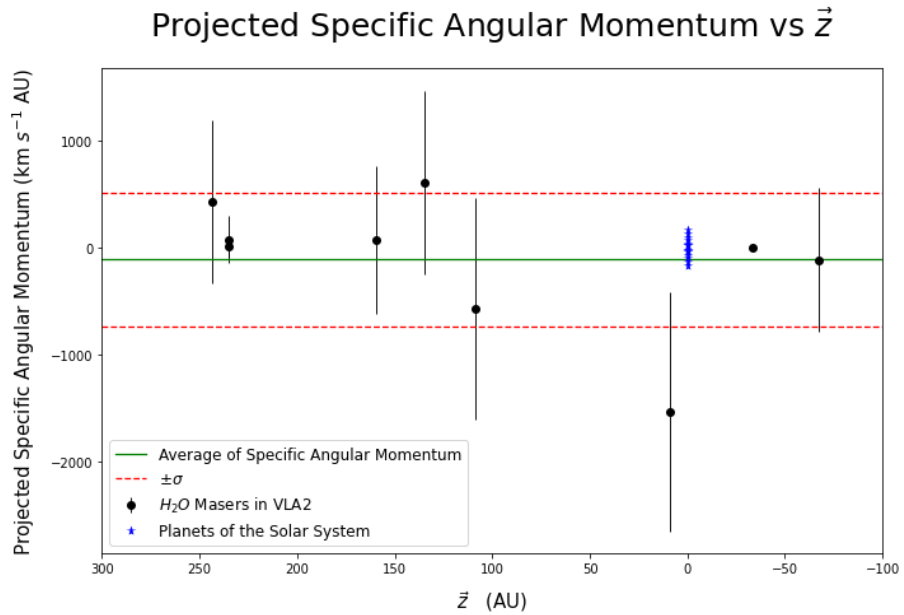


Fig. 7 As Figure 6 but for W75N(B) VLA 2.

CONCLUSIONS

We developed a Jupyter-notebook platform to search for specific angular momentum traced by masers in the outflows of high-mass star forming regions. We applied the code to 44 GHz CH₃OH masers in DR21(OH) and 22 GHz H₂O masers in W75N(B). While no statistically significant net specific angular momentum was detected in the sample, our results show that high-resolution maser observations (that can trace material closer to the launching site of the outflows) can reveal specific angular momentum values of individual maser spots that are similar to the magnitude of the specific angular momentum of planets in the Solar System. Therefore, evidence for net angular momentum transfer could be detectable in other sources for which masers are imaged with higher angular resolution, i.e., using very long baseline interferometry (VLBI). In the quest to develop a more complete platform to search for angular momentum in outflows, it will be important to further model the three-dimensional distribution of the masers.

ACKNOWLEDGMENT

The authors are grateful for comments and suggestions by an anonymous referee that helped us improve this manuscript. This project was developed as a part of the program INDIRA 2021 (*Investigación a Distancia en Radioastronomía*) organized by NINE HUB Costa Rica and Alpha Cen; NINE is an initiative of the National Radio Astronomy Observatory (NRAO) to enable underrepresented individuals to have access to radio astronomy related resources and networks. We thank these organizations for serving as a communication bridge between the authors. During the writing and development of this project, we were supported by Western Illinois University. EDA acknowledges partial support from the National Science Foundation (NSF) grant AST-1814063 (in collaboration with grant AST-1814011). DVLN acknowledges the SENACYT for the financial support during the last years of undergraduate studies.

REFERENCES

- Araya, E., Kurtz, S., Hofner, P., & Hendrik, L. (2009). Radio continuum and methanol observations of DR21(OH). *Astrophysical Journal*, 698(1), 1321-1329.
- Araya, E. D., Olmi, L., Morales Ortiz, J., Brown, J. E., Hofner, P., Kurtz, S., Linz, H., & Creech-Eakman, M. J. (2015). Formaldehyde masers: exclusive tracers of high-mass star formation. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 221(1), 10
- Baart, E., Cohen, R., Davies, R., Norris, R., & Rowland, P. (1986). Merlin observations of oh outflow in W75N. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 219, 145-155.
- Carrasco-González, C., Torrelles, J.M., Cantó, J., Curiel, S., Surcis, G., Vlemmings, W.H.T., van Langevelde, H.J., Goddi, C., Anglada, G., Kim, S.-W., Kim, J.-S., & Gómez, J.F. (2015). Observing the onset of outflow collimation in a massive protostar. *Science*, 348, 114-117.
- Haschick, A., Reid, M., Burke, B., Moran, J., & Miller, G. (1981). VLBI aperture synthesis observations of the oh maser source W75N. *Astrophysical Journal*, 244, 76-87.
- Kogan, L., & Slysh, V. (1998). VLA imaging of class I methanol masers at 7 millimeters with angular resolution $\sim 0''.2$. *The Astrophysical Journal*, 800-806.
- Kurtz, S., Hofner, P., & Vargas Álvarez, C. (2004). A catalog of CH₃OH 70 –61 A+ maser sources in massive star-forming regions. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 149-165.
- Lee, C.-F., Ho, P., Zhi-Yun, L., Hirano, N., Zhang, Q., & Shang, H. (2017). A rotating protostellar jet launched from the innermost disk of HH212. *Nature Astronomy*, 1(1), 0152.
- Motte, F., Bontemps, S., & Louvet, F. (2018). High-mass star and massive cluster formation in the milky way. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 56, 41-82.

Paulson, S. T., & Pandian, J. D. (2020). Probing the early phases of high-mass star formation with 6.7 GHz methanol masers. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 492(1), 1335-1347.



Saldaño, H. P. (2016). Propiedades físicas de núcleos pre-estelares masivos. Argentina: Universidad Nacional de Córdoba.

Torrelles, J., Gómez, J., & Rodríguez, L. (1997). A radio maser system in W75N(B) at a 200 Au scale: Exploring the H₂O Jet. *The Astrophysical Journal*, 489(1), 744-752.



LA FUNCIÓN DE CANTOR

**Daniel Vásquez S.¹, Edilma Judith Díaz B.¹, Jorge E. Hernández U.²,
Angela J. Franco²**

¹Universidad de Panamá, Facultad de Ciencias Naturales Exactas y Tecnología,
Departamento de Matemática. daniel.vasquez@up.ac.pa  edilma.diaz@up.ac.pa 

²Universidad de Panamá, Centro Regional Universitario de Veraguas, Departamento
de Matemática. jorge.hernandezu@up.ac.pa  angela.franco@up.ac.pa 

Fecha de recepción: 4 de octubre de 2022

Fecha de aceptación: 15 de noviembre de 2022

RESUMEN

Este trabajo está dirigido a estudiar el conjunto y la función de Cantor. El conjunto de Cantor posee propiedades que desafían la intuición geométrica. Se prueba que la función de Cantor es continua en todo punto del intervalo $[0,1]$, a pesar de que su gráfica no está compuesta de un solo trozo. El conjunto de Cantor toma su nombre de George F. L. P Cantor que en 1883 lo utilizó como herramienta de investigación para una de sus principales preocupaciones: el continuo.

PALABRAS CLAVES

Desarrollo decimal ternario, conjunto de Cantor, función de Cantor

THE CANTOR FUNCTION

ABSTRACT

This work is aimed at studying the set and the Cantor function. The Cantor set has properties that defy geometric intuition. It is proved that the Cantor function is continuous at every point in the interval $[0,1]$, even though its graph is not composed of a single piece. The Cantor set takes its name from George F. L. P Cantor, who in 1883 used it as a research tool for one of his major concerns: the continuum.

KEYWORDS

Ternary decimal expansion, Cantor set, Cantor function.

INTRODUCCIÓN

Hay muy pocos datos referentes a la historia del conjunto y la función de Cantor. En lo particular, Cantor no fue el primero en descubrir el conjunto de Cantor. Más aún, a pesar de que el descubrimiento original del conjunto de Cantor tenía un enfoque geométrico, el descubrimiento de Cantor del conjunto y la función de Cantor no estaba motivado por la geometría, ni involucraba la geometría, aunque es así como estos elementos son frecuentemente introducidos. De hecho, Cantor posiblemente dio con ellos mediante un razonamiento puramente aritmético.

Durante los años 1879-1884 Cantor escribió una serie de artículos titulados "Über unendliche lineare Punktmannichfaltigkeiten" que contenían el primer estudio sistemático de la topología del conjunto de puntos de la recta real. Después de introducir el término perfecto en el quinto artículo, Cantor estableció que los conjuntos perfectos no necesariamente son densos en todas partes. En la nota de pie de página de este documento Cantor introduce el conjunto que ha llegado a conocerse como el conjunto ternario de Cantor. El conjunto de números reales de la forma

$$x = \frac{c_1}{3} + \dots + \frac{c_v}{3^v} + \dots$$

donde c_v es 0 ó 2.

Durante el tiempo en que Cantor estuvo trabajando en los apuntes de "Punktmannichfaltigkeiten", otros trabajaban en la extensión del teorema fundamental del cálculo para funciones discontinuas. Cantor cita este aspecto en una carta fechada en noviembre de 1883, en la cual él define el conjunto de Cantor tal como lo definió en el documento mencionado anteriormente. No obstante, en la carta él pasa a definir la función de Cantor, la primera aparición conocida de esta función. Esta función es primero definida en el complemento del conjunto de Cantor como la función cuyos valores son

$$\frac{1}{2} \left(\frac{c_1}{2} + \dots + \frac{c_{u-1}}{2^{u-1}} + \frac{c_u}{2^u} \right)$$

1. DESARROLLO DECIMAL TERNARIO

Un número en el intervalo $[0,1]$ se escribe en base 3 de la siguiente manera:

$$\sum_{n=1}^{\infty} \frac{a_n}{3^n} = 0.a_1, a_2, \dots, a_n, \dots$$

donde cada $a_n = 0, 1$ ó 2 .

Por ejemplo

$$\frac{1}{9} = 0,01000 \dots$$

$$\frac{2}{3} = 0,2000 \dots$$

$$\frac{7}{9} = \frac{2}{3} + \frac{1}{9} = 0,21000 \dots$$

Mostremos que todo número del intervalo $[0,1[$ posee una expansión ternaria. En efecto, sean $x \in [0,1[$ y $A = \{0,1,2\}$. Dividamos $[0,1[$ en tres intervalos disjuntos de longitud $\frac{1}{3}$

$$I_{1,0} = \left[0, \frac{1}{3}\right]; \quad I_{1,1} = \left[\frac{1}{3}, \frac{2}{3}\right]; \quad I_{1,2} = \left[\frac{2}{3}, 1\right[$$

es decir:

$$I_{1,k} = \left[\frac{k}{3}, \frac{k+1}{3}\right[\text{ con } k \in A$$

Entonces existe un único $k_1 \in A$ tal que $x \in I_{1,k_1}$, por consiguiente

$$\frac{k_1}{3} \leq x < \frac{k_1 + 1}{3}$$

Dividamos I_{1,k_1} en tres intervalos disjuntos, de longitud $\frac{1}{3^2}$:

$$I_{2,0} = \left[\frac{k_1}{3}, \frac{k_1}{3} + \frac{1}{3^2} \right]; \quad I_{2,1} = \left[\frac{k_1}{3} + \frac{1}{3^2}, \frac{k_1}{3} + \frac{2}{3^2} \right]; \quad I_{2,2} = \left[\frac{k_1}{3} + \frac{2}{3^2}, \frac{k_1 + 1}{3} \right]$$

es decir,

$$I_{2,k} = \left[\frac{k_1}{3} + \frac{k}{3^2}, \frac{k_1}{3} + \frac{k}{3^2} + \frac{1}{3^2} \right] \text{ con } k \in A$$

Luego, existe un único $k_2 \in A$ tal que $x \in I_{2,k_2}$, por lo tanto

$$\frac{k_1}{3} + \frac{k_2}{3^2} \leq x < \frac{k_1}{3} + \frac{k_2}{3^2} + \frac{1}{3^2}$$

Repetiendo este proceso n veces encontramos n números $k_1, k_2, \dots, k_n \in A$ tales que:

$$\frac{k_1}{3} + \frac{k_2}{3^2} + \dots + \frac{k_n}{3^n} \leq x < \frac{k_1}{3} + \frac{k_2}{3^2} + \dots + \frac{k_n}{3^n} + \frac{1}{3^n}$$

Observemos ahora que, evidentemente, la sucesión

$$S_n = \sum_{j=1}^n \frac{k_j}{3^j}$$

es monótona, creciente y acotada superiormente por x , luego $\lim_{n \rightarrow \infty} S_n$ existe y, además

$$\lim_{n \rightarrow \infty} S_n \leq x$$

no obstante

$$0 \leq x - S_n \leq \left(\frac{k_1}{3} + \frac{k_2}{3^2} + \dots + \frac{k_n}{3^n} + \frac{1}{3^n} \right) - S_n = \left(S_n + \frac{1}{3^n} \right) - S_n = \frac{1}{3^n}$$

por lo tanto,

$$\lim_{n \rightarrow \infty} (x - S_n) = 0$$

y, en consecuencia

$$x = \lim_{n \rightarrow \infty} S_n = \sum_{j=1}^{\infty} \frac{k_j}{3^j} \text{ con } k_j \in A, \text{ para todo número natural } j$$

Se ha probado así que cada $x \in [0,1]$ admite un desarrollo decimal ternario:

$$x = \sum_{j=1}^{\infty} \frac{a_n}{3^n}, \text{ con } a_n \in A.$$

2. EL CONJUNTO DE CANTOR

El conjunto de Cantor y las funciones definidas sobre él son muy útiles, particularmente para la construcción de contraejemplos. El conjunto ternario de Cantor o simplemente el conjunto de Cantor fue exhibido por G. Cantor (1845-1918) como una ilustración de ciertas cosas curiosas que pueden ocurrir con conjuntos de puntos sobre la recta real. Algunas de las propiedades de este conjunto desafían la intuición geométrica.

Se presenta a continuación la construcción y propiedades del conjunto de Cantor. Sea $F = [0,1]$, entonces:

1) Se retira de F el intervalo abierto $I_{1,1} = \left] \frac{1}{3}, \frac{2}{3} \right[$, correspondiente al segundo tercio. Quedarán dos intervalos cerrados disjuntos

$$J_{1,1} = \left[0, \frac{1}{3} \right] \text{ y } J_{1,2} = \left[\frac{2}{3}, 1 \right]$$

Pongamos

$$P_1 = \left[0, \frac{1}{3} \right] \cup \left[\frac{2}{3}, 1 \right] = \bigcup_{k=1}^{2^1} J_{1,k} \quad \text{y} \quad V_1 = \left] \frac{1}{3}, \frac{2}{3} \right[= \bigcup_{k=1}^{2^{1-1}} I_{1,k}$$

es claro que P_1 es cerrado y V_1 es abierto.

2) De cada uno de los dos ($2^1 = 2$) intervalos $J_{1,1}$ y $J_{1,2}$ se retira el intervalo abierto correspondiente al segundo tercio. Quedarán cuatro ($2^2 = 4$) intervalos cerrados disjuntos al retirarse los intervalos abiertos

$$I_{2,1} = \left] \frac{1}{3^2}, \frac{2}{3^2} \right[\quad y \quad I_{2,2} = \left] \frac{7}{3^2}, \frac{8}{3^2} \right[$$

Pongamos

$$P_2 = \bigcup_{k=1}^{2^2} J_{2,k} \quad y \quad V_2 = \bigcup_{k=1}^{2^{2-1}} I_{2,k} \cup V_1$$

Es evidente que P_2 es cerrado V_2 es abierto.

3) En la n -ésima operación, en cada uno de los 2^{n-1} intervalos cerrados de la operación anterior

$$J_{n-1,1}, \dots, J_{n-1,2^{n-1}}$$

se retira el intervalo abierto correspondiente al segundo tercio:

$$I_{n,1}, \dots, I_{n,2^{n-1}} \quad (2^{n-1} \text{ intervalos})$$

Subsisten $2^{n-1} \cdot 2 = 2^n$ intervalos cerrados

$$J_{n,1}, \dots, J_{n,2^n}$$

Pongamos

$$P_n = \bigcup_{k=1}^{2^n} J_{n,k} \quad y \quad V_n = \bigcup_{k=1}^{2^{n-1}} I_{n,k} \cup V_{n-1}$$

Es evidente que P_n es cerrado y V_n es abierto (Phills, 1984).

Por definición, el conjunto de Cantor es

$$C = \bigcap_{n=1}^{\infty} P_n$$

Gráficamente el proceso de construcción del conjunto C queda descrito como muestra la Figura 1.

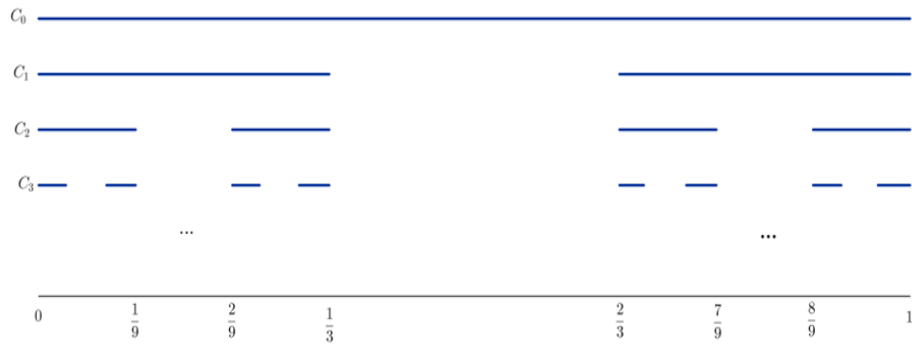


Figura 1. Descripción de la construcción del conjunto C.

Es claro que C contiene los puntos extremos de los intervalos $J_{n,k}$ que componen P_n

$$0, 1, \frac{1}{3}, \frac{2}{3}, \frac{1}{3^2}, \frac{2}{3^2}, \frac{7}{3^2}, \dots$$

Sin embargo, C contiene muchísimos más puntos que los indicados, como veremos en lo que sigue. En efecto, probaremos que

$$C = \left\{ x \in [0,1]: x = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{a_n}{3^n} = 0, a_1, a_2, a_3, \dots, \text{ con } a_n \in \{0,2\} \text{ para todo } n \geq 1 \right\}$$

Examinemos el complemento de P_n : Sea $x = 0, a_1, a_2, a_3, \dots$ (escrito en base 3) un elemento de $[0,1]$. Entonces,

$$\begin{aligned} x \in I_{1,1} &\Leftrightarrow \frac{1}{3} < x < \frac{2}{3} \\ &\Leftrightarrow 0,022 \dots < 0, a_1, a_2, a_3, \dots < 0,122 \dots \\ &\Leftrightarrow a_1 = 1 \end{aligned}$$

Del mismo modo

$$\begin{aligned}
 x \in \bigcup_{k=1}^2 I_{2,k} &\Leftrightarrow x \in I_{2,1} \quad \text{ó} \quad x \in I_{2,2} \\
 &\Leftrightarrow \frac{1}{3^2} < x < \frac{2}{3^2} \quad \text{ó} \quad \frac{7}{3^2} < x < \frac{8}{3^2} \\
 &\Leftrightarrow \begin{cases} 0,0100 \dots < 0, a_1, a_2, a_3, \dots < 0,0200 \dots \\ \text{ó} \\ 0,2100 \dots < 0, a_1, a_2, a_3, \dots < 0,2200 \dots \end{cases} \\
 &\Leftrightarrow \begin{cases} a_1 = 0 \text{ y } a_2 = 1 \\ \text{ó} \\ a_1 = 2 \text{ y } a_2 = 1 \end{cases} \\
 &\Leftrightarrow a_1 \neq 1 \text{ y } a_2 = 1
 \end{aligned}$$

En general,

$$x \in \bigcup_{k=1}^{2^{n-1}} I_{n,k} \Leftrightarrow a_1 \neq 1, a_2 \neq 1, \dots, a_{n-1} \neq 1 \text{ y } a_n = 1$$

Por otro lado, si x es un punto extremo de algún $J_{n,k}$ y por lo tanto un elemento de C , entonces x se escribe en la forma

$$x = \frac{a}{3^n} \text{ para algún } a \in \{0, 1, \dots, 3^n - 1\}$$

por lo tanto,

$$x = \frac{\alpha_1}{3} + \frac{\alpha_2}{3^2} + \dots + \frac{\alpha_{n-1}}{3^{n-1}} + \frac{\alpha_n}{3^n}, \quad \text{con } \alpha_n \in \{0, 2\}$$

ya que ningún $\alpha_i, i = 0, 1, \dots, n - 1$ puede ser igual a 1 pues, en ese caso x pertenecería a algún $I_{m,k}$ y en consecuencia $x \notin C$. Por lo tanto,

$$x = 0, \alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n 000 = \begin{cases} 0, \alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_{n-1} 000 \\ 0, \alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_{n-1} 200 \end{cases}$$

De todo lo anterior resulta que para todo $x \in [0,1]$, $x = 0, a_1, a_2, a_3, \dots$

$$x \in V_n \Leftrightarrow \text{existe } j, j \leq n \text{ tal que } a_j = 1$$

por lo tanto

$$x \in P_n \Leftrightarrow a_1 \neq 1, a_2 \neq 1, \dots, a_n \neq 1$$

en consecuencia

$$x \in C \Leftrightarrow a_n \neq 1 \text{ para todo } n \geq 1$$

Así pues,

En particular resulta que $\frac{1}{4} = 0,020202 \dots$ es un elemento del conjunto de Cantor y que no es un punto extremo de algún $J_{n,k}$ (pues no es de la forma $\frac{a}{3^n}$).

$$C = \left\{ x \in [0,1]: x = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{a_n}{3^n} = 0, a_1, a_2, a_3, \dots, \text{ con } a_n \in \{0,2\} \text{ para todo } n \geq 1 \right\}$$

En particular resulta que $\frac{1}{4} = 0,020202 \dots$ es un elemento del conjunto de Cantor y que no es un punto extremo de algún $J_{n,k}$ (pues no es de la forma $\frac{a}{3^n}$).

También pertenecen a C los siguientes números

$$x = \frac{1}{13} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2}{3^{3n}} = 0,002002 \dots$$

$$x = \frac{1}{39} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2}{3^{3n+1}} = 0,00020002 \dots$$

$$x = \frac{1}{39} + \frac{2}{3} = \frac{9}{13} = 0,20020002 \dots$$

y muchísimos números más (Wheeden, 1977).

Se está ahora en condiciones de examinar otras propiedades del conjunto C .

Teorema 2.1: C es un subconjunto compacto de \mathbb{R} .

Demostración: Por construcción $C = \bigcap_{n=1}^{\infty} P_n$ luego C es cerrado por ser intersección de cerrados; pero C también es acotado pues es un subconjunto de $[0,1]$ y en consecuencia, C es un conjunto compacto

Teorema 2.2: El interior de C es vacío

Demostración: Supongamos lo contrario, es decir, que el interior de C no es vacío. Luego existe $x \in C$ y $\varepsilon > 0$ tal que $I = \left]x - \frac{\varepsilon}{2}, x + \frac{\varepsilon}{2}\right[\subset C$. Por lo tanto, $I \subset P_n$ para todo $n \geq 1$. Por la propiedad arquimedea, existe $n_0 \in \mathbb{N}$ tal que $\varepsilon = |I| > \frac{1}{2^{n_0+1}}$. Luego para todo $n \geq n_0$ se tiene que $I_n = \left]x - \frac{1}{2^n}, x + \frac{1}{2^n}\right[\subset I$ con $|I_n| > \frac{1}{2^n}$; pero esto es una contradicción, pues P_n no puede tener intervalos con longitud mayor que $\frac{1}{2^n}$. Así pues, se concluye que el interior de C es vacío.

Teorema 2.3: El conjunto de Cantor C es no enumerable.

Demostración. Supongamos que C es enumerable, luego $C = \{c_1, c_2, \dots\}$. Consideremos el número $c = a_1, a_2, \dots$ en forma ternaria, de la siguiente manera:

$$a_1 = \begin{cases} 2 & \text{si el primer decimal de } c_1, \text{ escrito en forma ternaria, es } 0 \\ 0 & \text{si el primer decimal de } c_1, \text{ escrito en forma ternaria, es } 2 \end{cases}$$

$$a_2 = \begin{cases} 2 & \text{si el primer decimal de } c_2, \text{ escrito en forma ternaria, es } 0 \\ 0 & \text{si el primer decimal de } c_2, \text{ escrito en forma ternaria, es } 2 \end{cases}$$

$$a_n = \begin{cases} 2 & \text{si el primer decimal de } c_n, \text{ escrito en forma ternaria, es } 0 \\ 0 & \text{si el primer decimal de } c_n, \text{ escrito en forma ternaria, es } 2 \end{cases}$$

Se tiene que $c \in C$ y $c \neq a_n$ para todo $n \geq 1$, o cual es una contradicción. Así pues, C es un conjunto no enumerable.

Teorema 2.4: Todos los puntos del conjunto de Cantor C son puntos de acumulación de C

Demostración: Sea $x \in C$ y V una vecindad de x , entonces existe $\varepsilon > 0$ tal que

$$]x - \varepsilon, x + \varepsilon[\subseteq V.$$

Tome $n_0 \geq 1$ de modo que $\frac{1}{3^{n_0}} < \frac{\varepsilon}{2}$ y considere

$$P_{n_0} = \bigcup_{k=1}^{2^{n_0}} J_{n_0,k}, \text{ donde } |J_{n_0,k}| = \frac{1}{3^{n_0}}$$

Como $x \in C$ se tiene que $x \in P_{n_0}$, por lo tanto, existe un k_{n_0} tal que $x \in J_{n_0,k_{n_0}}$. Luego,

$$\left. \begin{array}{l} x \in J_{n_0,k_{n_0}} \\ |J_{n_0,k_{n_0}}| = \frac{1}{3^{n_0}} < \frac{\varepsilon}{2} \end{array} \right\} \Rightarrow x \in J_{n_0,k_{n_0}} \subseteq]x - \varepsilon, x + \varepsilon[\subseteq V$$

Mas aun, los puntos extremos de $J_{n_0,k_{n_0}}$ que son elementos de C , también pertenecen a V y, en consecuencia:

$$(V - \{x\}) \cap C \neq \phi$$

para toda vecindad V de x , es decir, x es un punto de acumulación de C .

Por los teoremas 2.1 y 2.4, se tiene que el conjunto de Cantor es un conjunto perfecto.

3. LA FUNCIÓN DE CANTOR.

Se define la función $f: C \rightarrow [0,1]$, llamada la función de Cantor, por la regla:

$$f\left(\sum_{i=1}^{\infty} \frac{a_i}{3^i}\right) = \sum_{i=1}^{\infty} \frac{r_i}{2^i} \text{ donde } r_i = \frac{1}{2}a_i$$

Es decir, si x es un elemento de C teniendo expansión ternaria $x = 0, a_1, a_2, a_3, \dots$ donde $a_i = 0$ ó 2 , entonces $f(x)$ es el número cuya expansión binaria (base 2) es $0, r_1, r_2, r_3, \dots$ donde $r_i = \frac{1}{2}a_i$

Características de f .

1. f es suryectiva.

En efecto, sea

$$y = \sum_{i=1}^{\infty} \frac{r_i}{2^i}$$

un elemento de $[0,1]$ con $r_i \in \{0,1\}$ y sea

$$x = \sum_{i=1}^{\infty} \frac{a_i}{3^i}$$

donde $a_i = 2r_i$. Entonces $a_i \in \{0,2\}$, por lo tanto,

$$x \in C \text{ y } f(x) = \sum_{i=1}^{\infty} \frac{r_i}{2^i} = y$$

lo cual prueba la suryectividad de f .

2. Si $I = (x, y)$, con $x < y$, es uno de los intervalos abiertos extraídos en el n -ésimo paso, en la construcción geométrica del conjunto de Cantor, entonces $f(x) = f(y)$.

En el primer paso se extrae el intervalo $\left] \frac{1}{3}, \frac{2}{3} \right[$

En el segundo paso se extraen los intervalos $\left] \frac{1}{9}, \frac{2}{9} \right[$ y $\left] \frac{7}{9}, \frac{8}{9} \right[$, los cuales se pueden expresar como

$$\left] \frac{1}{3^2} + \frac{b_1}{3}, \frac{2}{3^2} + \frac{b_1}{3} \right[\text{ con } b_1 = 0 \text{ ó } 2$$

Los intervalos que se extraen en el tercer paso se pueden expresar en la forma

$$\left] \frac{1}{3^3} + \frac{b_1}{3} + \frac{b_2}{3^2}, \frac{2}{3^3} + \frac{b_1}{3} + \frac{b_2}{3^2} \right[\text{ con } b_1, b_2 = 0 \text{ ó } 2$$

En el n-ésimo paso se extraen 2^{n-1} intervalos los cuales se pueden escribir como

$$\left] \frac{1}{3^n} + \frac{b_1}{3} + \frac{b_2}{3^2} + \dots + \frac{b_{n-1}}{3^{n-1}}, \frac{2}{3^n} + \frac{b_1}{3} + \frac{b_2}{3^2} + \dots + \frac{b_{n-1}}{3^{n-1}} \right[\text{ con } b_i = 0 \text{ ó } 2$$

es decir,

$$\left] \frac{1}{3^n} + \sum_{i=1}^{n-1} \frac{b_i}{3^i}, \frac{2}{3^n} + \sum_{i=1}^{n-1} \frac{b_i}{3^i} \right[\text{ con } b_i = 0 \text{ ó } 2$$

Mostremos que

$$f\left(\frac{1}{3^n} + \sum_{i=1}^{n-1} \frac{b_i}{3^i}\right) = f\left(\frac{2}{3^n} + \sum_{i=1}^{n-1} \frac{b_i}{3^i}\right) \text{ con } b_i = 0 \text{ ó } 2$$

En efecto, si

$$\frac{2}{3^n} + \sum_{i=1}^{n-1} \frac{b_i}{3^i} = 0, b_1 b_2 \dots b_{n-1} 2000 \dots$$

entonces

$$\begin{aligned} f\left(\frac{2}{3^n} + \sum_{i=1}^{n-1} \frac{b_i}{3^i}\right) &= 0, \frac{b_1}{2} \frac{b_2}{2} \dots \frac{b_{n-1}}{2} 1000 \dots \\ &= 0, \frac{b_1}{2} \frac{b_2}{2} \dots \frac{b_{n-1}}{2} + 0, \underbrace{00 \dots 00}_{n-1 \text{ veces}} 100 \dots \end{aligned}$$

$$= 0, \frac{b_1}{2} \frac{b_2}{2} \cdots \frac{b_{n-1}}{2} + \frac{1}{2^n}$$

Por otro lado, si

$$\frac{1}{3^n} + \sum_{i=1}^{n-1} \frac{b_i}{3^i} = 0, b_1 b_2 \cdots b_{n-1} 022 \cdots$$

entonces

$$\begin{aligned} f\left(\frac{1}{3^n} + \sum_{i=1}^{n-1} \frac{b_i}{3^i}\right) &= 0, \frac{b_1}{2} \frac{b_2}{2} \cdots \frac{b_{n-1}}{2} 011 \cdots \\ &= 0, \frac{b_1}{2} \frac{b_2}{2} \cdots \frac{b_{n-1}}{2} + 0, \underbrace{00 \cdots 00}_{n \text{ veces}} 111 \cdots \\ &= 0, \frac{b_1}{2} \frac{b_2}{2} \cdots \frac{b_{n-1}}{2} + \frac{1}{2^{n+1}} + \frac{1}{2^{n+2}} + \cdots \\ &= 0, \frac{b_1}{2} \frac{b_2}{2} \cdots \frac{b_{n-1}}{2} + \frac{1}{2^n} \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{2^2} + \cdots\right) \\ &= 0, \frac{b_1}{2} \frac{b_2}{2} \cdots \frac{b_{n-1}}{2} + \frac{1}{2^n} \end{aligned}$$

Por lo tanto

$$f\left(\frac{1}{3^n} + \sum_{i=1}^{n-1} \frac{b_i}{3^i}\right) = f\left(\frac{2}{3^n} + \sum_{i=1}^{n-1} \frac{b_i}{3^i}\right)$$

3. f es creciente sobre C ; es decir, si $x, y \in C$, con $x < y$, entonces $f(x) \leq f(y)$.

En efecto, sean $x = 0, x_1 x_2 \cdots$; $y = 0, y_1 y_2 \cdots$ dos elementos de C y supongamos que $x < y$.

Se probó anteriormente que, si x, y son extremos de los intervalos extraídos en la construcción del conjunto de Cantor, entonces, $f(x) = f(y)$.

Si este no es el caso, entonces existe un entero positivo k tal que

$$x_1 = y_1, x_2 = y_2, \dots, x_{n-1} = y_{n-1} \text{ y } x_k = 0 < y_k = 2$$

Por consiguiente

$$f(x) = 0, \frac{x_1}{2} \frac{x_1}{2} \dots \text{ y } f(y) = 0, \frac{y_1}{2} \frac{y_2}{2} \dots$$

de donde

$$\frac{x_1}{2} = \frac{y_1}{2}, \frac{x_2}{2} = \frac{y_2}{2}, \dots, \frac{x_{n-1}}{2} = \frac{y_{n-1}}{2} \text{ y } \frac{x_k}{2} = 0 < \frac{y_k}{2} = 1$$

Por lo tanto, $f(x) < f(y)$. En conclusión, se tiene que f es creciente.

Anteriormente se probó que la función de Cantor tiene el mismo valor en los dos extremos de cada intervalo suprimido en la construcción del conjunto de Cantor. Como muestra la Figura 2, si tomamos este valor común como valor constante de la función f en este intervalo, podemos extender la función de Cantor a todo el intervalo $[0,1]$. De esta manera, f será creciente sobre $[0,1]$.

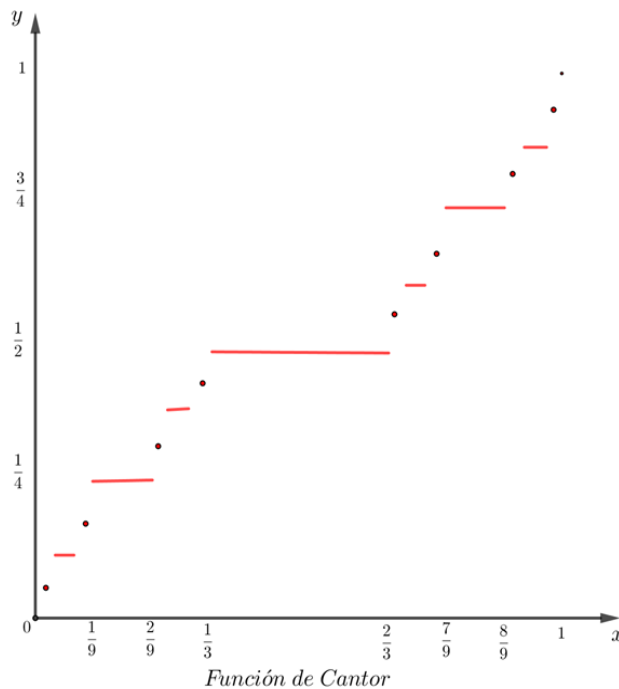


Figura 2. Extensión de la función de Cantor.

El siguiente teorema, referente a las funciones crecientes, es de vital importancia para el estudio de la función de Cantor (Bartle, 1999), (Rudin, 1980).

Teorema 3.1: Sea $g: [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$ una función creciente. Si g es suryectiva sobre $[g(a), g(b)]$ entonces es continua en $[a, b]$.

Como la función de Cantor es creciente y suryectiva en $[0,1]$, por el teorema anterior, es continua en $[0,1]$.

Con la función de Cantor se muestra cuánto se ha avanzado en el desarrollo del concepto de función a partir de la idea elemental de que una función continua "es aquella cuya gráfica se puede dibujar sin levantar el lápiz del papel".

REFERENCIAS

Bartle, R.G. (1999). Introducción al Análisis Matemático. Editorial Limusa, S.A. México.

Fleron, J. (1994). A Note on the History of the Cantor Set and Cantor Function. *Mathematics Magazine. An Official Publication of The Mathematical Association of America*. Vol. 67. Washington, D.C. pags 136-140.

Phillps, E. (1984). An Introduction to Analysis and Integration Theory. Dover Edition U.S.A.

Rudin, W. (1980). Principios de Análisis Matemático. McGraw-Hill Book. México.

Wheeden, RL. (1977). Measure and Integral an Introduction to Real Analysis. Marcel Dekker, Inc. New York.






Tecnociencia, Vol. 25, N°1: 209-229

Enero-Junio 2023

ISS L 2415-0940

CARACTERIZACIÓN GEOMORFOLÓGICA, FLORÍSTICA Y ESTRUCTURAL DEL MANGLAR EN LA COSTA DE PIXVAE, GOLFO DE CHIRIQUÍ, PACÍFICO DE PANAMÁ

Rosa G. Castillero¹ Angel Javier Vega^{1, 2} Yolani A. Robles P.¹ Jaime Rivera¹

¹Universidad de Panamá, Centro de Capacitación, Investigación y Monitoreo de la Biodiversidad en el Parque Nacional Coiba (CCIMBIO-CRUV-UP). Veraguas, Panamá. rosa-1110@hotmail.com  yolany.robles@up.ac.pa 
jaime.rivera@up.ac.pa 

²Estación Científica del Parque Nacional Coiba (Coiba-AIP). Clayton, ciudad de Panamá, Panamá. angel.vega@up.ac.pa 

Fecha de recepción 13 de octubre de 2022

Fecha de aceptación 21 de noviembre de 2022

RESUMEN

Con el objetivo de generar información sobre la cobertura, composición florística y caracterización estructural del manglar en la costa de Pixvae, se realizaron muestreos entre febrero y abril de 2021. Para estimar la cobertura se utilizó la imagen satelital Planet Scope (2020), y el Raster DTM (2020). Para evaluar la composición florística y caracterización estructural se establecieron 42 cuadrantes de 10 m x 10 m, paralelos a los esteros y hacia la parte interna del manglar, en donde se registraron las especies, la altura de los árboles y la circunferencia a 1.30 cm de altura. Se calculó el área basal, densidad, volumen de los árboles y la regeneración. La extensión del manglar se estableció en 93.6 ha, se identificaron cuatro especies de mangle y dos especies asociadas. El histograma reflejó una distribución en forma de j invertida, con un mayor número de árboles entre los 2.5 y 10 cm y poca representación de árboles con diámetros superiores a los 10 cm. Se registró regeneración en todos los cuadrantes, *Pelliciera rhizophorae* fue la especie que presentó el mayor número de plántulas. Este estudio es la primera caracterización del manglar de Pixvae, lo que representa un insumo importante para establecer el plan de manejo del área.

PALABRAS CLAVES

Bahía de Pixvae, florística, *Pelliciera*, *Rhizophora*, regeneración.

GEOMORPHOLOGICAL, FLORISTIC AND STRUCTURAL CHARACTERIZATION OF THE MANGROVE IN THE PIXVAE COAST, GULF OF CHIRIQUÍ, PACIFIC OF PANAMA

ABSTRACT

Between February and April 2021, information on the cover, floristic composition, and structural characterization of the mangrove on the Pixvae coast, Veraguas, Pacific Panama, was generated. Coverage was estimated using the Planet Scope (2020) satellite image and the Raster DTM (2020). For the floristic composition and structural characterization, 42 quadrants of 10 m x 10 m were established parallel to the estuaries and towards the inner part of the mangrove, where the species, height of trees, and circumference at 1.30 cm were recorded. The basal area, density, volume of the trees, and regeneration were calculated as well. Five mangrove species and other associated species were identified in an area of 93.6 ha. The histogram reflected an inverted j-shaped distribution, with a greater number of trees between 2.5 and 10 cm and little representation of trees with diameters greater than 10 cm. Regeneration was recorded in all quadrants, and *Pelliciera rhizophorae* was the species that presented the highest number of seedlings. This study presents the first characterization of the Pixvae mangrove, which is an important component towards establishing the management plan for the area.

KEYWORDS

Pixvae Bay, floristic, *Pelliciera*, *Rhizophora*, regeneration

INTRODUCCIÓN

Los manglares constituyen uno de los ecosistemas de mayor importancia, ya que ofrecen una variedad de bienes y servicios, vitales para el bienestar de las comunidades costeras y para garantizar la seguridad alimentaria (Van Lavieren et al., 2012; López-Angarita et al., 2016). Su importancia ha sido resaltada en diferentes estudios que incluyen su rol en el sostenimiento de la pesca (Vega et al., 2007, Hutchison et al., 2014), en el almacenamiento de carbono y el turismo basado en los manglares (Tanner et al., 2019), así como una diversidad de servicios ecosistémicos, que incluyen regulación, cultura, provisión y soporte (Oses-Carvajal et al., 2019).

Las interacciones entre el manglar y los seres humanos han repercutido de manera negativa en su conservación, es así como desde tiempos coloniales se les veía como reservorio de enfermedades, por ejemplo, la malaria, lo que provocó que se drenaran y secaran (Friess, 2016). Esta visión de los manglares, como ecosistemas improductivos, llevó a la pérdida de cerca del 68% de la cobertura del manglar (López-Angarita et al., 2016).

La evaluación de las características estructurales del bosque permite conocer las condiciones en las que se encuentra el mismo (Alvis-Gordo, 2009), lo que facilita la comprensión de la dinámica forestal; información que es esencial para la formulación de pautas de manejo, cuyo objetivo es garantizar la conservación y aprovechamiento sustentable de estos ecosistemas (Téllez-García & Valdez-Hernández, 2012). Así mismo, la determinación de la cobertura es fundamental para establecer cambios a lo largo del tiempo (Benavides-Vareal, 2016), lo cual se puede realizar a través de técnicas de geoprocésamiento que permiten transformar los datos georreferenciados, en información ambiental (Tabacow y Da Silva, 2011).

De acuerdo con Velázquez-Pérez et al. (2019) la estructura del bosque de manglar está relacionada con la producción de biomasa arbórea y, por lo tanto, con el almacenamiento de carbono del componente arbóreo, lo que indica que a través de la caracterización estructural del manglar podemos estimar el papel que juegan estos ecosistemas en la mitigación del cambio climático.

Para Panamá se tiene información sobre la variación de la estructura del manglar y la presencia de nutrientes (Lovelock et al., 2005, Dangremond & Feller, 2014), estructura y composición de los manglares en el Archipiélago de las Perlas (McGowan et al., 2010), estructura y biomasa aérea de un bosque de *Pelliciera rhizophorae* en el Golfo de Montijo (Gross et al., 2014). Para la costa de Pixvae, Valiela et al. (2013) indicaron que el manglar es de tipo ribereño, con dominancia de las especies *Rhizophora mangle* y *Pelliciera rhizophorae*, además de encontrarse en menor proporción las especies *Avicennia germinans*, *Laguncularia racemosa* y *Tabebuia palustris*.

La Bahía de Pixvae fue reconocida como unidad de comanejo con base en estudios sobre sus fondos y la actividad pesquera desarrollada en la

zona (ARAP, 2019), sin embargo, el ecosistema de manglar de Pixvae es poco conocido, por lo que el objetivo de este estudio fue determinar la geomorfología, cobertura, composición florística y las características estructurales del manglar de Pixvae, para fortalecer el conocimiento sobre el mismo y de esta manera contribuir con insumos para un mejor manejo del área protegida.

MATERIALES Y METODOS

Área de estudio: los ríos de la Mona y Pixvae conforman en su desembocadura un pequeño estuario cubierto de mangle donde ocurren transformaciones de la materia orgánica para contribuir a la calidad de las aguas costeras (Valiela et al., 2018). Para las cuencas de los ríos de la Mona y Pixvae se reportó un porcentaje de cobertura vegetal de 73% y 47%, respectivamente, producto de la deforestación para el desarrollo de pastizales, lo que se asocia a la mayor descarga de material particulado en suspensión, con menor porcentaje C y N, y mayor contenido de minerales hacia la zona estuarina, asociada al ecosistema de manglar (Valiela et al., 2014).

En su componente terrestre, la zona costera se caracteriza por presentar una geología compleja, suelos poco profundos y pendientes elevadas, con valor máximo de 9.8% para el río Pixvae y 7.1% para el río la Mona (Ibáñez, 2005; Valiela et al., 2014). Los materiales geológicos subyacentes son altamente heterogéneos espacialmente, con basaltos fracturados y diabases volcánicas, esquistos, gabros y lutitas marinas y aluviales y areniscas (Valiela et al., 2013).

Estimación de la extensión de la planicie fluvio-marina y cobertura de manglar: Se estimaron con base en la imagen Planet Scope (2020), y el raster DTM (2020) y se realizaron validaciones en campo. Para analizar posibles variaciones en extensión y cobertura se comparó con los mapas topográficos Filo de Mona y Punta Pajarón (Instituto Geográfico Nacional Tommy Guardia-IGNT, 2012). Para tal fin, se integraron y manipularon en ambiente ArcGIS 10.7.1. los datos geoespaciales, junto a los datos georreferenciados en campo colectados para verificar la amplitud de pleamar.

Composición florística y caracterización estructural: Para determinar la composición florística y la caracterización estructural del manglar se realizaron giras de 5 días de duración, en febrero, marzo y abril de 2021. Para los muestreos se establecieron 42 cuadrantes de 10 m x 10 m, separados por 30 m y distribuidos en cuatro transectos, uno paralelo a la línea de costa (26 cuadrantes) y tres hacia la parte interna del manglar (16 cuadrantes), dos de ellos bordeaban los esteros Pixvae y estero Largo, y el tercero se estableció en un camino que atraviesa el manglar (Fig. 1).

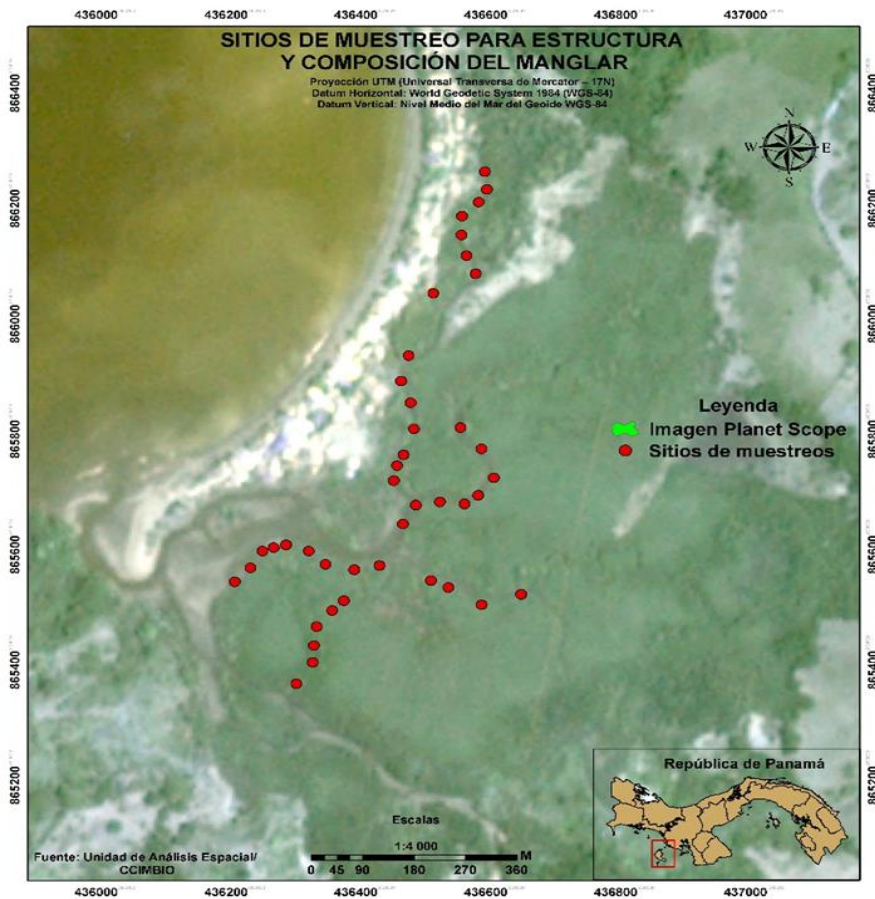


Fig. 1. Estaciones de muestreos para la caracterización de los manglares de Pixvae. Los puntos representan los sitios de muestreo. Fuente: CCIMBIO. Imagen Planet Scope, CCIMBIO.

Se midió la altura de todos los árboles con un hipsómetro Forestry pro II marca Nikon, y la circunferencia a una altura de 1.30 m para *L. racemosa*, *P. rhizophorae* y *A. germinans* y en el caso de *R. mangle*, la medición se realizó 30 cm sobre la raíz aérea más alta (Kauffman et al. 2013). Posteriormente este valor se transformó a diámetro (DAP) dividiéndolo por el valor de π (3.1416). Para los análisis sólo se consideraron árboles DAP mayor a 2.5 cm (Cintrón & Schaeffer-Novelli, 1984) y se emplearon tres categorías diamétricas: brinzales ($2.5 \leq x < 5.0$ cm), latizales ($5.0 \leq x < 10.0$ cm) y fustales (≥ 10 cm) (Cintrón-Molero & Schaeffer-Novelli, 1992). A partir de esos datos se calculó:

$$\text{Área basal AB} = \frac{\text{DAP}^2}{4} \times \pi$$

DAP=diámetro a la altura del pecho (Navarrete-Ramírez & Rodríguez-Rincón, 2014).

Densidad: Definida como el número de árboles por hectárea.
Volumen total de madera $Vt = \text{DAP}^2 \times Ht$

DAP= diámetro a la altura del pecho (m), Ht = altura total (m) (Valdez-Hernández, 2004).

En todos los transectos se desarrollaron conteos de plántulas, para lo cual se establecieron dos subcuadrantes de 1 m² dentro de cada cuadrante, y se contabilizaron todos los árboles con diámetro menor a 2.5 cm (PNUD y MiAmbiente, 2017).

Como parte de la caracterización del sistema, se utilizó un registro puntual de temperatura (°C), salinidad (UPS) y pH superficial, medido en seis estaciones en el canal del río Pixvae, en la sección que atraviesa el manglar, en diciembre de 2019, con el uso de una sonda multiparamétrica Hanna.

Dado que no se cumplieron los supuestos de normalidad y homocedasticidad se aplicó la prueba de Kruskal-Wallis para analizar las diferencias de los atributos estructurales por especie entre transectos y la prueba de comparaciones múltiples de Bonferroni para determinar diferencias entre grupos, en todos los casos para $\alpha = 0.05$ (Zar, 2009). Estos análisis se realizaron con el programa IBM SPSS Statistics.

RESULTADOS

Con base en los puntos UTM georreferenciados y la imagen satelital (2020), se confirma que la planicie fluviomarina totaliza 106.3 ha, de la cuales 93.6 ha se encuentra cubiertas de manglar (Fig. 2).

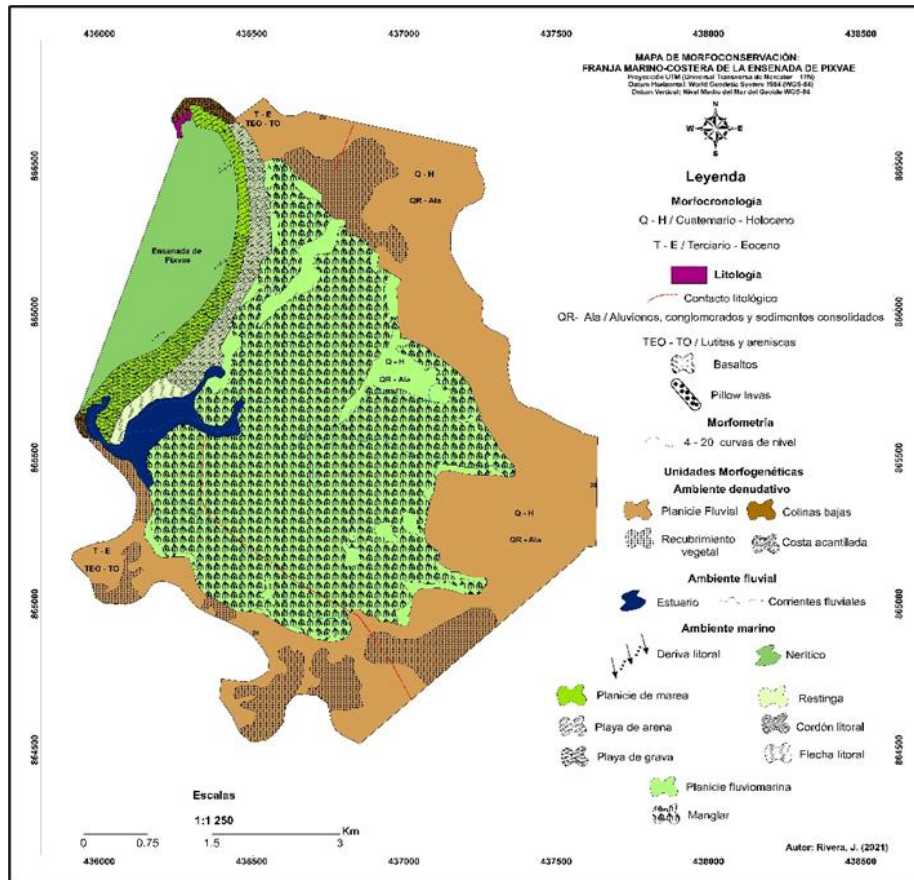


Fig. 2. Ensenada de Pixvae. Geofacies por unidades morfogenéticas. Fuente: Unidad de análisis espacial. CCIMBIO 2021.

Descripción del manglar: El manglar de Pixvae, está limitado en su parte frontal, hacia la Bahía de Pixvae, por una formación arenosa (relinga) sobre la que se ubica el poblado y en su parte posterior, por áreas de cultivo y ganadería. Las fuentes de agua dulce la aportan los ríos de la Mona y Pixvae, y la única fuente de intercambio con el mar la constituye un pequeño canal en el extremo suroeste de la playa, por donde entran embarcaciones pequeñas en marea alta (Fig. 3).



Fig. 3. A. Barrera de arena que separa la Bahía de Pixvae del ecosistema de manglar. Sobre el área de barrera se asienta la comunidad de Pixvae. B. Punto de intercambio entre el ecosistema de manglar con la Bahía de Pixvae.

Los registros de temperatura, salinidad y pH, en la sección que atraviesa el manglar, reflejó una condición ligeramente básica en el agua, así como valores de salinidad y temperatura que no superaron las 30 ups y 30 °C (Cuadro 1).

Cuadro 1. Valores de temperatura, salinidad y pH, registrados en 5 puntos en el canal del río Pixvae que atraviesa el manglar, desde la parte externa del manglar hasta la boca del estuario en marea alta. Muestreo, diciembre de 2019.

Parámetros fisicoquímicos	E1	E2	E3	E4	E5
pH	8.36	8.45	8.54	8.57	8.56
Salinidad (PSU)	26.25	26.89	28.16	28.22	28.21
Temperatura (°C)	29.31	29.35	29.32	29.25	29.33

El primer transecto se caracterizó por tener sustratos inestables arenosos (cuadrantes 1-2), por la presencia de enredaderas (cuadrantes 4-8), sustrato fangoso estables (cuadrantes 3-15) y sustratos duros, limosos y con presencia de rocas en los cuadrantes cercanos a la desembocadura del río Mona. Los transectos dos, tres y cuatro se caracterizaron por la presencia de sustratos fangosos estables. Cabe señalar que en los cuatro

transectos se observó tala selectiva, ya que los pobladores cortan árboles de poco diámetro. Esta actividad es mayor en el transecto que se estableció en el camino que atraviesa el manglar (Fig. 4).



Fig. 4. Imagen del manglar de Pixvae, obsérvese la trocha a través del sistema. Foto CCIMBIO diciembre de 2019.

En 4 200 m², se identificaron cinco especies de mangle: *Pelliciera rhizophorae* (mangle piñuelo) que representó el 85.00%, *Avicennia germinans* (mangle negro) 8.00%, *Laguncularia racemosa* (Mangle blanco) 4.07%, *Rhizophora mangle* (mangle rojo) 2.93%, adicionalmente fuera de los transectos, se identificó a *Conocarpus erectus* (mangle botón), y dos especies asociadas al manglar, *Mora oleifera* (alcornoque) y *Acrostichum aureum* (helecho de manglar).

P. rhizophorae se distribuyó desde el bode de los canales y esteros hasta la parte interna del manglar, cuando el sustrato está constituido por fango duro, consolidado; mientras que en sustrato areno-fangoso, inestable, se observó la presencia de *R. mangle*, en franjas estrechas, bordeando el estero. Las restantes especies se observaron en la parte interna del manglar, donde el sustrato es estable consolidado (Fig. 5).



Fig. 5. Áreas del manglar de Pixvae con presencia de *R. mangle* (mangle rojo) a la izquierda y *P. rhizophorae* (piñuelo) a la derecha, en ambos casos, bordeando el canal. Obsérvese la diferencia del sustrato, de apariencia más consolidado el caso del mangle piñuelo.

La mayor frecuencia de árboles presentó una altura entre los 4 y 6 m (Fig. 6); y el 52% se ubicó entre los 4 y 8 cm de DAP. Se registraron árboles de mayor altura y DAP, pero en menor número, lo que indica que existe poco desarrollo estructural. El análisis de las categorías diamétricas muestra que el 96% de los árboles muestreados correspondieron a brinzales y latizales, lo que indica que existe una distribución en forma de J invertida, ya que el mayor número de individuos (85%) se ubicó por debajo de los 10 cm de DAP (Fig. 7).

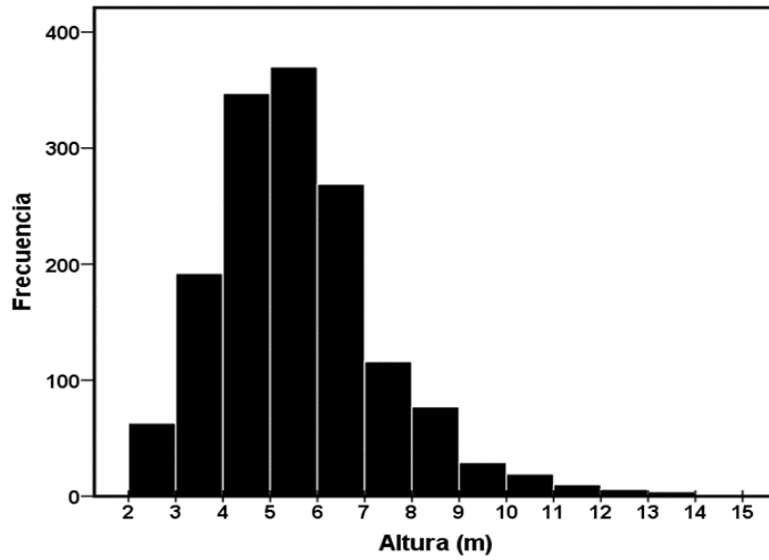


Fig. 6. Distribución de la altura de los árboles en el manglar de Pixvae, Pacífico panameño. Muestréos realizados entre febrero y abril de 2021.

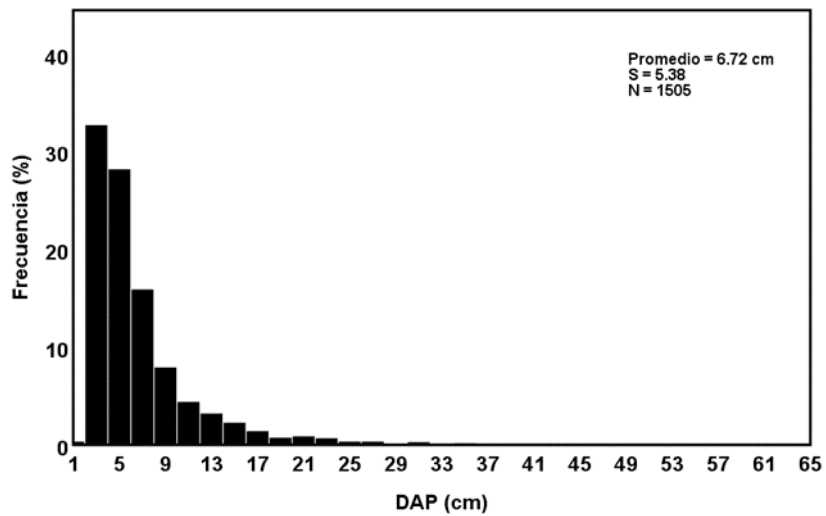


Fig. 7. Distribución diamétrica (DAP) de los árboles en el manglar de Pixvae. Muestreo realizado entre febrero y abril de 2021.

Por especie, entre transectos, se determinó diferencias en la altura, DAP, AB y V para *P. rhizophorae* y *A. germinans*. Para la densidad, la diferencia se estableció para *P. rhizophorae*, *L. racemosa* y *R. mangle* (Kruskal-Wallis, $P < 0.05$). Para la especie más abundante (*P. rhizophorae*) los árboles de mayor altura, DAP, AB y V se presentaron en el transecto 2 (Bonferroni, $p < 0.05$) (Cuadro 2).

Cuadro 2. Comparación entre transectos de la altura, diámetro altura pecho (DAP), área basal (AB), volumen (V) y densidad (D) para las diferentes especies de mangle presentes en el manglar de Pixvae. Letras diferentes indican diferencias significativas.

Especie	Parámetro	Transecto			
		1	2	3	4
<i>P. rhizophorae</i>	Altura (m)	4.70 (a)	6.60 (b)	4.70 (a)	4.80 (a)
	DAP (cm)	6.59 (ab)	7.60 (a)	5.77 (b)	6.85 (ab)
	AB (m ² /ha)	59.72 (ab)	78.81 (a)	21.47 (b)	20.06 (b)
	V (m ³ /ha)	531.23 (ab)	767.87 (a)	120.22 (b)	112.43 (b)
	D (árboles/ha)	2742 (ab)	3867 (ab)	4900 (a)	2250 (b)
<i>A. germinans</i>	Altura (m)	5.60 (a)	6.60 (a)	10.10 (b)	5.40 (a)
	DAP (cm)	8.11 (a)	15.70 (b)	18.07 (b)	7.18 (a)
	AB (m ² /ha)	72.13 (a)	250.40 (b)	92.77 (ab)	100.23 (ab)
	V (m ³ /ha)	575.94 (a)	2340.84 (b)	721.54 (a)	778.11 (a)
	D (árboles/ha)	208 (a)	133 (a)	100 (a)	125a
<i>L. racemosa</i>	Altura (m)	6.00 (a)	6.50 (a)	.	5.20 (a)
	DAP (cm)	6.52 (a)	10.66 (a)	.	5.09 (a)
	AB (m ² /ha)	45.29 (a)	89.31 (a)	.	83.38 (a)
	V (m ³ /ha)	399.09 (a)	739.10 (a)	.	735.58 (a)
	D (árboles/ha)	168 (a)			25 (b)
<i>R. mangle</i>	Altura (m)	4.50 (a)	5.80 (a)	3.40 (a)	2.60 (a)
	DAP (cm)	3.99 (a)	5.51 (a)	6.37 (a)	2.64 (a)
	AB (m ² /ha)	13.55 (a)	28.58 (a)	31.83 (a)	20.78 (a)
	V (m ³ /ha)	85.66 (a)	240.14 (a)	137.80 (a)	136.59 (a)
	D (árboles/ha)	35 (a)	167 (b)	17 (a)	25 (a)

La cantidad de plántulas por transectos resultó superior en *P. rhizophorae* (Kruskal-Wallis, $P < 0.05$) (Cuadro 3).

Cuadro 3. Plántulas por transecto para las diferentes especies presentes en los sitios de muestreo del manglar de Pixvae. Letras diferentes indican diferencias significativas.

Especie	<i>P. rhizophorae</i>	<i>A. germinas</i>	<i>L. racemosa</i>	<i>R. mangle</i>
Plántulas/m ²	7 (a)	2 (b)	2 (b)	1 (b)

Amenazas al manglar: en recorridos por el manglar se documentó la presencia de desechos producto de la actividad humana, como redes de pesca, envases de “foam”, recipientes y bolsas plásticas. Otro factor documentado es la cría de cerdos en jaulas de madera sobre el borde del manglar, de tal forma que al subir la marea se lavan los desechos producidos por el cerdo (Fig. 8).



Fig. 8. Restos de redes de pesca, bolsas y envases plásticos, recipientes de foam, platos plásticos para comida, así como encierros para la cría de cerdos en el borde del manglar, todos agentes contaminantes documentados en un recorrido realizado por el manglar.

DISCUSIÓN

La extensión estimada de la geofacia en este estudio es de 106.3 ha, que comparada con el valor de 100.4 ha, reportado del IGNTG (2012), se observa un aumento de 5.9 ha. Según IGNTG (2012) el 100% de la planicie fluviomarina estaba cubierta por mangle, sin embargo, a través de las nuevas cartas generadas y la verificación de campo, se cuantificó que los mismos decrecieron 6.8 ha, con un estimado de cobertura de mangle de 93.6 ha. Las diferencias en extensión y cobertura del manglar pueden estar asociadas al tipo de análisis y validación en campo de las imágenes y a la pérdida de manglar por actividades antropogénicas.

El manglar de Pixvae cuenta con cinco de las siete especies de mangle reportadas para el Pacífico de Panamá (ANAM-ARAP, 2013), de las cuales *P. rhizophorae* resultó dominante. McGowan et al. (2010), para el archipiélago de Las Perlas, Pacífico panameño, comunicó la presencia de *P. rhizophorae*, *R. racemosa* y *L. racemosa*, esta última dominante en uno de los tres sitios de muestreo, debido a la presencia de un arroyo; mientras que Gross et al. (2014) en el sector del Río de Jesús, Golfo de Montijo, reportó que *P. rhizophorae* dominó en los primeros 150 m del borde del río, y *R. racemosa* la parte interna del manglar, además de la presencia de *Avicennia germinans* y la especie asociada, *Mora oleifera*, ambas hacia zonas alejadas del río, sobre sustrato más consolidados.

Según Barrantes Leiva & Cerdas Salas (2015), la distribución de las diferentes especies de mangle en el sistema de manglar Térraba-Sierpe, Pacífico sur de Costa Rica, está influenciada por diferentes factores físicos, tales como el ambiente sedimentológico, el tipo de granulometrías de los sustratos y la influencia mareal y fluvial, el clima, salinidad del agua y del suelo entre otros, por lo que en el caso de Pixvae, es importante profundizar en estudios que evalúen estos factores, para identificar su influencia en la distribución de las especies.

La dominancia de *P. rhizophorae* en el manglar de Pixvae puede estar asociada a la presencia de un sustrato consolidado, dominante en el sitio; lo cual coincide con lo expuesto por von Prahl (1987), para el Pacífico colombiano, donde asocia la presencia del mangle piñuelo a este tipo de sustrato. Otros factores para considerar son la presencia de lluvias abundantes en el área (Ibáñez, 2005), acompañadas de una entrada limitada del agua marina y del impacto del oleaje en el sistema de

manglar, por la estrecha comunicación entre el estuario y la bahía de Pixvae, lo que favorece que la salinidad no supere los 37 ups, límite de tolerancia superior establecido por Jiménez (1987) para esta especie. Otros autores asocian la distribución y desarrollo del mangle piñuelo en Panamá, a las concentraciones de fósforo y nitrógeno en el sistema, lo cual afecta la forma de crecimiento (Lovelock et al., 2005, Dangremond & Feller, 2014), lo cual sugiere la necesidad de desarrollar un estudio de la estructura y composición del sustrato en el sitio para entender de mejor manera la composición y distribución de especies arbóreas en el manglar de Pixvae.

Pixvae presenta un bosque estructuralmente poco desarrollado, aunque maduro, ya que se observaron árboles que no sobrepasan los 2 m de altura y se encontraban en floración y fructificación, lo que propicia la producción de una mayor cantidad de semillas y propágulos, que aumentan la probabilidad de establecerse exitosamente (Alfaro-Sibaja et al., 2015). La variación de los atributos estructurales puede ser causada por el flujo de mareas, oleajes, temperatura, salinidad, pH, aporte de agua dulce y nutrientes (Alongi, 2009, Agudelo et al., 2015). Otro aspecto para considerar, son los valores altos de densidad y área basal, comparado con resultados de estudios desarrollados en Golfo Dulce, en el Pacífico sur de Costa Rica (Samper-Villarreal & Silva-Benavides, 2015), lo que es señal de un manglar en buen estado ecológico, según parámetros establecidos para manglares de Colombia (Navarrete-Ramírez & Rodríguez-Rincón, 2014). A estos indicadores, se suma la presencia de brinzales y de plántulas, en este último caso entre 4 y 6 plántulas/m², superior a lo reportado para la Ciénaga de Cholón, Colombia que reportan 1.28 plántulas/m² (Valle et al., 2012), lo que contribuye a aumentar la probabilidad de regeneración exitosa en el manglar.

Las amenazas al manglar de Pixvae, están asociadas a las actividades antrópicas, la existencia de criaderos de cerdos en jaulas sobre el borde del manglar, la gran cantidad de basura retenida por las raíces de los árboles que impacta de manera negativa el ecosistema, de la misma forma que la deforestación localizada en los terrenos montañosos que rodean el poblado de Pixvae, que según Valiela et al. (2013), son fuente de sedimentos que llegan al manglar y a la Bahía a través de las escorrentías y los ríos. Sin duda, se necesita un trabajo con la comunidad para concienciar sobre el valor del ecosistema de manglar presente en

Pixvae, dominado por una especie de distribución restringida (*P. rhizophorae*), catalogada como vulnerable según la Lista Roja de Especies Amenazadas de la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (UICN) (Semacaritt et al., 2022).

CONCLUSION

En general el manglar de Pixvae tiene un rodal mixto, con presencia de cinco especies de mangle. Es uno de los pocos en Panamá cuya especie más abundante es *P. rhizophorae*. Se caracteriza por alcanzar la madurez con poco desarrollo estructural y es un manglar con capacidad de regeneración, ya que se observó la presencia de plántulas y de brinzales.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece el apoyo financiero de la Secretaría Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación de Panamá (SENACYT), de Conservación Internacional, con el apoyo de la iniciativa Blue Action Fund. y a los pares revisores por su contribución para mejorar el manuscrito.

REFERENCIAS

Agudelo, C. M., Bolívar, J., Polanía, J., Urrego, L. E., Yepes, A., & Sierra, A. (2015). Estructura y composición florística de los manglares de la bahía de Cispatá, Caribe colombiano. *Revista de Biología Tropical*, 63(4), 1137-1147.

Alfaro-Sibaja, L., Barquero-Salgado, D., Fonseca, A., Montoya-Solano, R. A., Morales-Cerdas, V., & Ramírez-Arce, D. (2015). Estructura y composición vegetal del manglar Palo Seco, Quepos, Costa Rica. *Cuadernos de Investigación UNED*, 7(2), 325-332.

Alongi, D. (2009). *The energetics of mangrove forests*. Springer Science & Business Media.

Alvis-Gordo, J. F. (2009). Análisis estructural de un bosque natural localizado en zona rural del municipio de Popayán. *Biotecnología en el sector Agropecuario y Agroindustrial*, 7(1), 115-122.

Autoridad de los Recursos Acuáticos de Panamá (ARAP) (2019). *Resolución ADM/ARAP 012, por la cual se establece un área marina denominada Zona de Co-manejo para la pesca responsable en la Bahía de Pixvae*. Gaceta Oficial N° 28770 del 9 de mayo de 2019.

Autoridad Nacional del Ambiente & Autoridad de los Recursos Acuáticos de Panamá (ANAM-ARAP). (2013). *Manglares de Panamá: importancia, mejores prácticas y regulaciones vigentes*. Panamá: Editora Novo Art, S.A

Autoridad Nacional de Ambiente (ANAM). (2009). *Plan de Manejo del Parque Nacional Coiba*. Compiladores Maté, J. L., Tovar, D., Arcia, E., Hidalgo-STRI.

Barrantes Leiva, R. M., & Cerdas Salas, A. (2015). Distribución espacial de las especies de mangle y su asociación con los tipos de sedimentos del sustrato, en el sector estuarino del Humedal Nacional Térraba-Sierpe, Costa Rica. *Revista de Biología Tropical*, 63, 47-60.

Benavides-Varela, C., Samper-Villarreal, J., & Cortés, J. (2016). Cambios en la cobertura de manglares en Bahía Culebra, Pacífico Norte de Costa Rica (1945-2010). *Revista de Biología Tropical*, 64(3), 955-964.

Centro del Agua del Trópico Húmedo para América Latina y el Caribe (CATHALAC). (2007). *Diagnósticos Biofísico, Institucional-Legal, Socioeconómico y Línea Base del Bosque de Manglar del Golfo de Chiriquí, Provincia de Chiriquí*. CATHALAC, Ciudad de Panamá, Panamá.

Cintrón, G., & Schaeffer-Novelli, Y. (1984). Methods for studying mangrove structure. *Monographs on oceanographic methodology*, 8, 91-113.

Cintrón-Molero, G., & Schaeffer-Novelli, Y. (1992). Ecology and management of New World mangroves. In *Coastal plant communities of Latin America* (pp. 233-258). Academic Press.

Dangremond, E. M., & Feller, I. C. (2014). Functional traits and nutrient limitation in the rare mangrove *Pelliciera rhizophorae*. *Aquatic botany*, 116, 1-7.

Friess, D. A. (2016). Ecosystem services and disservices of mangrove forests: insights from historical colonial observations. *Forests*, 7(9), 183.

Gross, J., Flores, E. E., & Schwendenmann, L. (2014). Stand structure and aboveground biomass of a *Pelliciera rhizophorae* mangrove forest, Gulf of Montijo Ramsar site, Pacific Coast, Panama. *Wetlands*, 34(1), 55-65.

Hutchison, J., Spalding, M., & zu Ermgassen, P. (2014). The role of mangroves in fisheries enhancement. *The Nature Conservancy and Wetlands International*, 54, 434.

Ibáñez, A. (2005). *Características geográficas, geológicas y climáticas de Bahía Honda (Veraguas, Panamá)*. En Castroviejo, S. & Ibáñez, A. (Ed.), *Estudios sobre la biodiversidad de la región de Bahía Honda (Veraguas, Panamá)* (pp 23-32). España: Consejo Superior de Investigaciones Científicas.

Instituto Geográfico Nacional Tommy Guardia (IGNTG) (2012). Hojas topográficas de Punta Pajarón y Filo de Mona. Escala 1:25 000. <https://n9.cl/78eqx>

Kauffman, J. B., Donato, D. C., & Adame, M. F. (2013). *Protocolo para la medición, monitoreo y reporte de la estructura, biomasa y reservas de carbono de los manglares* (Vol. 117). Cifor.

López-Angarita, J., Roberts, C. M., Tilley, A., Hawkins, J. P., & Cooke, R. G. (2016). Mangroves and people: Lessons from a history of use and abuse in four Latin American countries. *Forest Ecology and Management*, 368, 151-162.

Lovelock, C. E., Feller, I. C., McKee, K. L., & Thompson, R. C. (2005). Variation in mangrove forest structure and sediment characteristics in Bocas del Toro, Panama. *caribbean Journal of Science*.

McGowan, T., Cunningham, S. L., Guzmán, H. M., Mair, J. M., Guevara, J. M., & Betts, T. (2010). Mangrove forest composition and structure in Las Perlas Archipelago, Pacific Panama. *Revista de Biología Tropical*, 58(3), 857-869.

Navarrete-Ramírez, S. M., & Rodríguez-Rincón, A. M. (2014). *Protocolo Indicador Condición Tendencia Bosques de Manglar (ICTBM)*. Indicadores de monitoreo biológico del Subsistema de Áreas Marinas Protegidas (SAMP).

Oses-Carvajal, M. D., Ulloa, A. H., Rodríguez, B. V., & Rodríguez, R. C. (2019). Manglares y sus Servicios Ecosistémicos: hacia un Desarrollo Sostenible. *Gestión y Ambiente*, 22(2), 277-290.

PNUD y MiAMBIENTE. (2017). *Guía de Buenas Prácticas para la Restauración de Áreas degradadas de Manglar. Proyecto Protección de Reservas y Sumideros de Carbono en los Manglares y Áreas Protegidas de Panamá*. PNUD, Ciudad del Saber, Panamá.

Samper-Villarreal, J., & Silva-Benavides, A. M. (2015). Complejidad estructural de los manglares de Playa Blanca, Escondido y Rincón de Osa, Golfo Dulce, Costa Rica. *Revista de Biología Tropical*, 63, 199-208.

Schaeffer-Novelli Y, & Cintrón-Mollero, G. (1986). *Guía para estudio de áreas de manguezal. Estructura, função e flora*. São Paulo, Caribbean Ecological Research: São Paulo, Brazil.

Semacaritt, K., Gutiérrez-Arauz, K. M., & Otero-Moreno, Y. Y. (2022). *Catálogo de especies de fauna y flora protegidas más traficadas en Panamá*. Ministerio de Ambiente, Panamá.

Tabacow, J., & Da Silva, J. (2011). *Geoprocessamento aplicado à análise da fragmentação da paisagem na ilha de Santa Catarina*. In: Silva, J; Zaidan, R. (Org.). Geoprocessamento & Meio Ambiente. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil.

Tanner, M. K., Moity, N., Costa, M. T., Jarrin, J. R. M., Aburto-Oropeza, O., & Salinas-de-León, P. (2019). Mangroves in the Galapagos: ecosystem services and their valuation. *Ecological economics*, 160, 12-24.

Téllez-García, C. P., & Valdez-Hernández, J. I. (2012). Caracterización estructural del manglar en el estero Palo Verde, Laguna de Cuyutlán,

Colima. *Revista Chapingo serie ciencias forestales y del ambiente*, 18(3), 395-408.

Valdez-Hernández, J. I. (2004). Manejo forestal de un manglar al sur de Marismas Nacionales, Nayarit. *Rev. Madera y Bosques*, 2, 93-104.

Valiela, I., Giblin, A., Barth-Jensen, C., Harris, C., Stone, T., Fox, S. & Crusius, J., (2013). Nutrient gradients in Panamanian estuaries: effects of watershed deforestation, rainfall, upwelling, and within-estuary transformations. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 482, 1-15.

Valiela, I., Bartholomew, M., Giblin, A., Tucker, J., Harris, C., Martinetto, P., M. Otter, Camilli, L. & Stone, T., (2014). Watershed deforestation and down-estuary transformations alter sources, transport, and export of suspended particles in Panamanian mangrove estuaries. *Ecosystems*, 17, 91–111.

Valiela, I., Pascual, J., Giblina, A., Barth-Jensen, C., Martinetto, P., Ottera, M., Stone, T., Tucker, J., Bartholomew, M. & Vianad, I.G. (2018). External and local controls on land-sea coupling assessed by stable isotopic signatures of mangrove producers in estuaries of Pacific Panama. *Marine Environmental Research*, 137, 133–144

Valle, A. G., Osorno-Arango, A. M., & Gil-Agudelo, D. L. (2011). Estructura y regeneración del bosque de manglar de la ciénaga de Cholón, Isla Barú, Parque Nacional Natural Corales del Rosario y San Bernardo, Caribe colombiano. *Boletín de Investigaciones Marinas y Costeras-INVEMAR*, 40(1), 115-130.

Van Lavieren, H., Spalding, M., Alongi, D., Kainuma, M., Clüsener-Godt, M. and Adeel, Z. (2012). Securing the future of mangroves. A Policy Brief. UNU-INWEH, UNESCOMAB with ISME, ITTO, FAO, UNEP-WCMC and TNC.

Vega, A., Smith, O., & Morán, M. (2007). *Diagnóstico del Estado Actual de los Manglares, su Manejo y su Relación con la Pesquería en Panamá: Análisis de la relación existente entre las poblaciones de fauna marina de importancia económica con las variables socioeconómicas y biofísicas del ecosistema del bosque de manglar, en la República de Panamá*. Autoridad de los Recursos Acuáticos de

Panamá / Fundación Natura / Centro del Agua del Trópico Húmedo para América Latina y el Caribe (CATHALAC)

Velázquez-Pérez, C., Tovilla-Hernández, C., Romero-Berny, E. I. & De Jesús-Navarrete, A. (2019). Estructura del manglar y su influencia en el almacén de carbono en la Reserva La Encrucijada, Chiapas, México. *Madera bosques*, 25(3), 1-14.

von Prah, H. (1986). Notas sobre la historia natural del mangle Piñuelo *Pelliciera phizophorae* (Theaceae) en el Pacífico colombiano. *Actualidades Biológicas*, 15(58), 117-122.

Zar, J. H. (2009). *Biostatistical analysis*. ed. 5ta. New Jersey, USA.