

Biología y Sociedad



Una publicación de la
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

Dr. Santos Guzmán López
Rector

Dr. Mario Alberto Garza Castillo
Secretario General

Dr. Jaime Arturo Castillo Elizondo
Secretario Académico

Dr. José Javier Villarreal Tostado
Secretario de Extensión y Cultura

Lic. Antonio Ramos Revillas
Director de Publicaciones

Dra. Diana Reséndez Pérez
Coordinadora de la Facultad de Ciencias Biológicas

Cuerpo Editorial de Biología y Sociedad

Dr. Jesús Ángel de León González
Editor en Jefe

Dra. María Elena García Garza
Editor Técnico

Editores adjuntos:

Dr. Juan Gabriel Báez González
Dra. María Elena Sosa Morales
Dra. Miriam Rutiaga Quiñones
Alimentos

Dr. Sergio I. Salazar Vallejo
Dra. Evelyn Patricia Ríos Mendoza
Dr. Marco Antonio Alvarado Vázquez
Dr. Gerardo Rivas
Biología Contemporánea

Dr. José Ignacio González Rojas
Dr. Eduardo Alfonso Rebollar Téllez
Dr. Erick Cristóbal Oñate González
Dr. José Rolando Bastida Zavala
Dra. Martha González Elizondo
Ecología y Sustentabilidad

Dr. Reyes S. Tamez Guerra
Dr. Jorge Enrique Castro Garza
Dr. Iram P. Rodríguez Sánchez
Dr. Ivan Delgado Enciso
Salud

Dr. Sergio Arturo Galindo Rodríguez
Dra. Ana Laura Lara Rivera
Dr. Virgilio Bocanegra-García
Dr. Luis Miguel Canseco Ávila
M.C. Aldo Vega Esquivel
Biotecnología

Jorge Ortega Villegas
Diseñador Gráfico

Ing. Jorge Alberto Ibarra Rodríguez
Página web

BIOLOGÍA Y SOCIEDAD, año 9, No. 17, primer semestre de 2026, es una publicación semestral editada por el Universidad Autónoma de Nuevo León, a través de la Facultad de Ciencias Biológicas. Av. Universidad s/n, Cd. Universitaria San Nicolás de los Garza, Nuevo León, www.uanl.mx, biologiaysociedad@uanl.mx, Editor responsable: Dr. Jesús Ángel de León González. Número de Reserva de Derechos al Uso Exclusivo No. 04-2017-060914413700-203; ISSN 2992-6939. Ambos otorgados por el Instituto Nacional de Derecho de Autor. Las opiniones y contenidos expresados en los artículos son responsabilidad exclusiva de los autores y no necesariamente flejan la postura del editor de la publicación. **Queda prohibida la reproducción total o parcial, en cualquier forma o medio, del contenido de la publicación sin previa autorización.**

CONTENIDO

PERROS Y GATOS: EL IMPACTO DE LAS MASCOTAS EN LA SIERRA DE SANTIAGO, NUEVO LEÓN	4
CUANDO SE VA EL AGUA, SE VA LA VIDA: HISTORIAS DE EXTINCIÓN DE PECES EN NUEVO LEÓN	17
SISTEMAS LACUSTRES BAJO LA LUPA: ANÁLISIS DE CALIDAD DE AGUA EN LA RESERVA DE LA BIOSFERA SIERRA LA LAGUNA Y OASIS ALEDAÑOS	23
DE LA MEDICINA AL AMBIENTE: LA PRESENCIA DE FÁRMACOS EN LOS ECOSISTEMAS ACUÁTICOS.	31
EL CACTUS DE BARRIL: PROPAGACIÓN MEDIANTE EL CULTIVO IN VITRO	40
INTERACCIONES POSITIVAS ENTRE UN ÁRBOL INVASOR, EL PIRUL, Y LA AVIFAUNA DE MÉXICO	48
DEL CAMPO AL PLATO: ¿SON SEGUROS LOS ALIMENTOS QUE CONSUMIMOS? UN ANÁLISIS DE LOS LÍMITES MÁXIMOS DE RESIDUOS Y SU IMPORTANCIA CIENTÍFICA	56
EVASIÓN Y RESISTENCIA: EL CÁNCER FRENTE A NUESTRAS DEFENSAS	60
LA INFLUENCIA DEL CLIMA EN LA MIGRACIÓN DEL COLIBRÍ ZUMBADOR CANELO	69
PALEOAMBIENTES EN LA PENÍNSULA DE YUCATÁN: HISTORIA CLIMÁTICA Y PALEOECOLÓGICA	76
¿CÓMO LOGRAR LA CONSOLIDACIÓN DE UNA AGRUPACIÓN ACADÉMICA? EL CASO DE UN GRUPO ENFOCADO EN LA CONSERVACIÓN BIOLÓGICA	85
“CUANDO EL ENTORNO DEJA HUELLA: TERATOGENÉISIS Y LOS RIESGOS DEL AMBIENTE EN EL DESARROLLO EMBRIONARIO”	93
THE PRESENCE OF THE RESPLENDENT QUETZAL <i>PHAROMACHRUS MOCINNO</i> IN OAXACA, MEXICO	101
AMPLIFICACIÓN ISOTÉRMICA DE ÁCIDOS NUCLEICOS “EL FUTURO DEL DIAGNÓSTICO MOLECULAR”	107
SOBRE LOS AUTORES	113

El Comité Editorial de Biología y Sociedad le da la bienvenida a los nuevos integrantes que fungirán como Editores Adjuntos dentro del Comité, las Doctoras María Elena Sosa Morales y Miriam Rutiaga Quiñones en el área de Alimentos, el Dr. Gerardo Rivas en el área de Biología Contemporánea, los Doctores José Rolando Bastida Zavala y Martha González Elizondo en el área de Ecología y Sustentabilidad, el Dr. Iván Delgado Enciso en el área de Salud, así como los Doctores Virgilio Bocanegra-García, Luis Miguel Canseco Ávila y Aldo Vega Esquivel en el área de Biotecnología, sean todos ustedes bienvenidos.

En el décimo séptimo número de Biología y Sociedad nos complace compartir con ustedes nuestros lectores una colección de artículos que contemplan una gran variedad de temas.

La introducción de especies exóticas es un gran problema para la conservación de áreas naturales protegidas en nuestro país. En este trabajo se habla sobre el impacto de perros y gatos que una vez fueron domésticos y que por abandono o extravío ya no lo son. Mediante un análisis de riesgo, los autores evalúan el impacto de estos animales en el Parque Nacional Cumbres de Monterrey.

En otro trabajo, los autores resaltan la importancia de la toma adecuada de medidas de conservación de los recursos hídricos por la constante pérdida de biodiversidad en el Noreste de México, una zona semidesértica que ha pasado por crisis de sequía constante en los últimos años.

En el mismo tenor, otro grupo de investigadores evalúan la calidad del agua en la reserva de la biósfera Sierra la Laguna en Baja California Sur, encontrando una sobrexplotación y vertido de desechos contaminantes en sus acuíferos, la zona es por demás importante ya que es la fuente de abastecimiento de agua de dos de las ciudades más importantes del estado, La Paz y la región de Los Cabos.

El agua es un tema recurrente en este número, en otro trabajo, los autores tratan sobre el problema de los medicamentos farmacológicos vertidos en los sanitarios y que llegan a los cuerpos de agua a través del desagüe, afectando a las especies que en estos viven. Sin embargo, destacan nuevas tecnologías para la remoción de medicamentos en aguas residuales, así como diversas estrategias para que estos lleguen al medio ambiente.

Mediante una colaboración internacional los investigadores hacen una descripción de la distribución de cactáceas en América, destacan generalidades de una especie, el cactus de barril y su estado de vulnerabilidad por el constante manejo en su hábitat original, así como técnicas de cultivo in vitro y la aplicación de esa tecnología en especies afines.

Normalmente se realizan críticas a las introducciones de especies no nativas a cualquier zona, sin embargo, en este trabajo, los autores resaltan la importancia de una especie de planta introducida hace cinco siglos a la zona central de México, se trata del Pirúl, un árbol de origen sudamericano, destacando las interacciones que tiene con la avifauna nativa.

Los límites máximos de residuos como plaguicidas y medicamentos veterinarios en los alimentos generados en el campo son analizados en este trabajo, aquí se destaca la importancia de fortalecer sistemas de monitoreo, exigir certificaciones de sanidad y realizar una modernización a la infraestructura de análisis de residuos para traer alimentos saludables a nuestras mesas.

El cáncer sigue siendo una enfermedad temida y terrible, y puede aparecer en cualquier persona o etapa de la vida. En este trabajo, los autores explican como el sistema inmunológico es el encargado de detectar y eliminar células anormales, así como algunas de estas células han encontrado la forma de no ser detectadas mediante tres etapas en una estrategia llamada inmuoedición del cáncer.

Muchas especies de aves son migratorias, cuando pensamos en ellas vemos especies de tamaño considerable. Sin embargo, hay entre las especies pequeñas como el colibrí algunas que también son migratorias. En este trabajo, los autores profundizan en una especie, el colibrí zumbador canelo, una especie que se reproduce en Canadá y norte de los Estados Unidos en primavera y verano, y se traslada al sureste de los Estados Unidos y sur de México para pasar el otoño e invierno, destacando los obstáculos que actualmente encuentran en su trayecto, como el cambio climático y la pérdida de hábitat.

En otro trabajo, los autores nos detallan los cambios ambientales que ha sufrido la Península de Yucatán destacando las condiciones áridas y la presencia de sabanas y matorrales durante el pleistoceno hasta inicios del Holoceno, donde el incremento de la temperatura global permitió la expansión de selvas tropicales y el desarrollo de ecosistemas acuáticos.

La consolidación de un grupo académico es un trabajo gigante, en este estudio de caso se analiza la trayectoria de un grupo de investigación, resaltando los productos de formación de recursos humanos y publicaciones como medida para explicar el avance de dicho grupo ahora consolidado.

La teratogénesis, explicada en este trabajo, es el proceso mediante el cual agentes externos afectan directamente el desarrollo de embriones, provocando en él, anomalías estructurales y funcionales. Conocer como nuestro entorno afecta el proceso embrionario es de gran importancia, ayudando a identificar factores de riesgo.

Las selvas del sur de México encierran hallazgos pocas veces vistos, en este trabajo, los autores reportan la presencia del quetzal para Oaxaca después de 70 años, el quetzal un ave esplendorosa que se encuentra enlistada en la NOM cuya distribución es desde el sur de México hasta todo Centroamérica.

En el último trabajo de este número, los autores narran como una herramienta molecular, la amplificación isotérmica de ácidos nucleicos, ha surgido como una alternativa al diagnóstico molecular, permitiendo la detección rápida y precisa de patógenos y biomarcadores sin necesidad de equipo especializado, lo que permite hacer frente a situaciones de crisis solitarias.

Biología y Sociedad en este décimo séptimo número, agradece la dedicación y compromiso de todas y todos los autores y coautores de los artículos incluidos aquí, a las y los miembros del Cuerpo y Comité Editorial que de forma puntual y cabal dieron un profesional seguimiento a cada manuscrito. A todas y todos, nuestro más profundo reconocimiento, ya que gracias a su compromiso pudo ver la luz este nuevo número.

Dr. Jesús Angel de León González
Editor en Jefe

PERROS Y GATOS:

EL IMPACTO DE LAS MASCOTAS
EN LA SIERRA DE SANTIAGO,
NUEVO LEÓN

/// KATYA LIZETH ORTIZ-MORALES¹
& JUAN ANTONIO GARCÍA-SALAS¹



¹ Laboratorio de Ornitología, Facultad de Ciencias Biológicas, Universidad Autónoma de Nuevo León, San Nicolás de los Garza, Nuevo León, México. CP 66450

RESUMEN

La conservación de las áreas naturales en México ha encontrado una mayor cantidad de obstáculos a medida que avanza la urbanización y la explosión demográfica humana. Una problemática de suma importancia es la introducción de especies exóticas, sobre todo tratándose de especies asociadas al ser humano como los perros (*Canis lupus familiaris*) y los gatos (*Felis silvestris catus*). Estas especies provocan diversos impactos ecológicos, socioeconómicos y sanitarios tanto en las especies nativas de la región como en las poblaciones humanas. En el presente trabajo, se utilizó la metodología de Análisis de Riesgo (Baptiste *et al.*, 2010), para evaluar los posibles impactos de los perros y gatos domésticos en el Parque Nacional Cumbres de Monterrey (PNCM); en el municipio de Santiago, Nuevo León, México. Ambas especies obtuvieron el resultado de nivel "Muy Alto", por lo que se concluyó, que la presencia de ambas especies en el área de estudio ejerce una amenaza de impacto negativo que obstaculiza los esfuerzos de conservación.

ABSTRACT

When discussing the conservation of natural areas in Mexico, larger obstacles have been encountered as urbanization progresses alongside human demographics, being the introduction of exotic species one of the most important issues, specially when it comes to species so intimately linked to humans such as dogs (*Canis lupus familiaris*) and cats (*Felis silvestris catus*). These species can cause various impacts at ecological, socioeconomic, and sanitary levels to both native species in the region and human populations. The Risk Analysis methodology developed by Baptiste *et al.* (2010) was used to assess the potential impacts that domestic dogs and cats may exert within the boundaries of the Cumbres de Monterrey National Park (PNCM) in the municipality of Santiago, Nuevo León. Both species obtained "Very High" level results, thus it is concluded that the presence of both species in the study area poses a significant threat of negative impact that could hinder conservation efforts.



PALABRAS CLAVE: áreas naturales protegidas, análisis de riesgo, especies exóticas, gato doméstico, perro doméstico

KEY WORDS: alien species, domestic cat, domestic dog, natural protected areas, risk assessment

1. INTRODUCCIÓN

Dentro de las principales problemáticas que amenazan a la conservación de las áreas naturales protegidas y su biodiversidad, se encuentran la fragmentación del hábitat, la sobreexplotación de los recursos faunísticos y florísticos, la contaminación, y se destaca la introducción de especies exóticas (Programa de la Naciones Unidas para el Medio Ambiente [PNUMA], 2012). Estas, al volverse invasoras, pueden llegar a provocar depredación y desplazamiento de especies nativas tanto vegetales como animales, así como representar amenazas a la salud pública y de la vida silvestre al ser portadores de enfermedades y de vectores que transmiten agentes patógenos, y, por consiguiente, la presión económica e impacto sociocultural que conlleva la atención y resolución de las problemáticas derivadas.

En México, la problemática de introducción de especies exóticas es grave, ya que hasta el 2009, se contabilizaban 724 especies incluyendo plantas vasculares y vertebrados exóticos (Aguirre-Muñoz *et al.*, 2009). Por lo cual, a través de instituciones como la Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (CONANP), la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO), organismos académicos e instituciones no gubernamentales, se han desarrollado e implementado estrategias para cubrir aspectos clave mediante acciones de conservación e implementación de reglas administrativas para lograr la detección, prevención y erradicación de las especies exóticas con potencial invasor. Así mismo, se realizan programas de monitoreo sistemático o en zonas clave para asegurarse de que las especies erradicadas no sean reintroducidas y, adicionalmente, se implementan estrategias formales de educación ambiental para promover el conocimiento de los impactos y medidas preventivas, con la finalidad de evitar la afectación de las áreas naturales protegidas (Aguirre-Muñoz *et al.*, 2009).

Una de las principales herramientas utilizadas en estas estrategias son los análisis de riesgo. Estos se basan en aspectos importantes relacionados con cada una de las especies a analizar, como sus características biológicas reproductivas y de dispersión, su potencial de impacto en los ecosistemas y la salud humana y animal, así como sus medidas de remediación y control; y de esta manera poder asignar un valor numérico que nos permita guiar la toma de decisiones respecto a su manejo (Baptiste *et al.*, 2010).

Los perros y gatos domésticos son especies altamente asociadas al humano desde hace miles de años, inicialmente siendo apreciados por su labor en la cacería o control de plagas y actualmente teniendo un

alto valor sentimental para el humano como animales de compañía o incluso de soporte emocional (Bao & Schreer, 2016). Sin embargo, esto ha provocado que estas especies hayan sido ampliamente diseminadas por el mundo, encontrándose en casi todos los continentes del planeta en calidad de exóticas (Doherty *et al.*, 2016). En México, estas especies no son nativas, y su presencia descontrolada en las Áreas Naturales Protegidas (ANP) ha provocado diversos impactos negativos (Orduña-Villaseñor *et al.*, 2023).

1.2 SITUACIÓN DE LOS MAMÍFEROS EXÓTICOS DENTRO DEL PARQUE NACIONAL CUMBRES DE MONTERREY

El día 03 de enero del 2023, la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) en conjunto con la CONANP, por medio del Diario Oficial de la Federación (DOF), publicó el decreto que constituía legalmente la reglamentación y regulación de las actividades dentro del Parque Nacional Cumbres de Monterrey (PNCM) por medio del Programa de Manejo asociado al Área Natural Protegida (ANP) (SEMARNAT & CONANP, 2023). En este programa, se estableció explícitamente la restricción de la introducción de especies exóticas y/o invasoras, ya que representan una amenaza para la conservación de la biodiversidad nativa.

Así mismo, se declaró la regulación de la ganadería de subsistencia dentro de las subzonas y agostaderos seleccionados para este fin. Esta actividad es una de las principales generadoras de ingresos para las comunidades rurales dentro del polígono del PNCM y se practica en cinco de los municipios que la conforman (CONANP, 2014). El municipio de Santiago es la localidad con el mayor número de Unidades de Producción Ganadera y con los mayores problemas por la presencia de mamíferos exóticos (Ortiz-Hernández *et al.* 2013).

Respecto a los animales de compañía como perros y gatos, a pesar de que su presencia no se había explorado de manera formal dentro del PNCM, esta se encuentra principalmente agravada por factores como el cambio de uso de suelo para el desarrollo inmobiliario dentro y fuera de los límites del ANP (Aragón-Palacios, 2013); el ecoturismo y actividades de recreación sin mecanismos de vigilancia y regulación aplicados de manera local (Camargo-Ortega & Vaquero-Molina, 2021). Sin embargo, algunos ganaderos continúan utilizando a los perros domésticos como apoyo en el pastoreo de sus hatos, así como para su protección frente a depredadores como osos negros (*Ursus americanus*) y pumas (*Puma concolor*). En el caso de los gatos, estos son mantenidos principalmente como animales de compañía y como controladores de plagas (Rodríguez-Galván *et al.*, 2018; CONANP, com. pers.). En este trabajo, exploramos su presencia dentro del Parque Nacional Cumbres de Monterrey (PNCM) en su porción

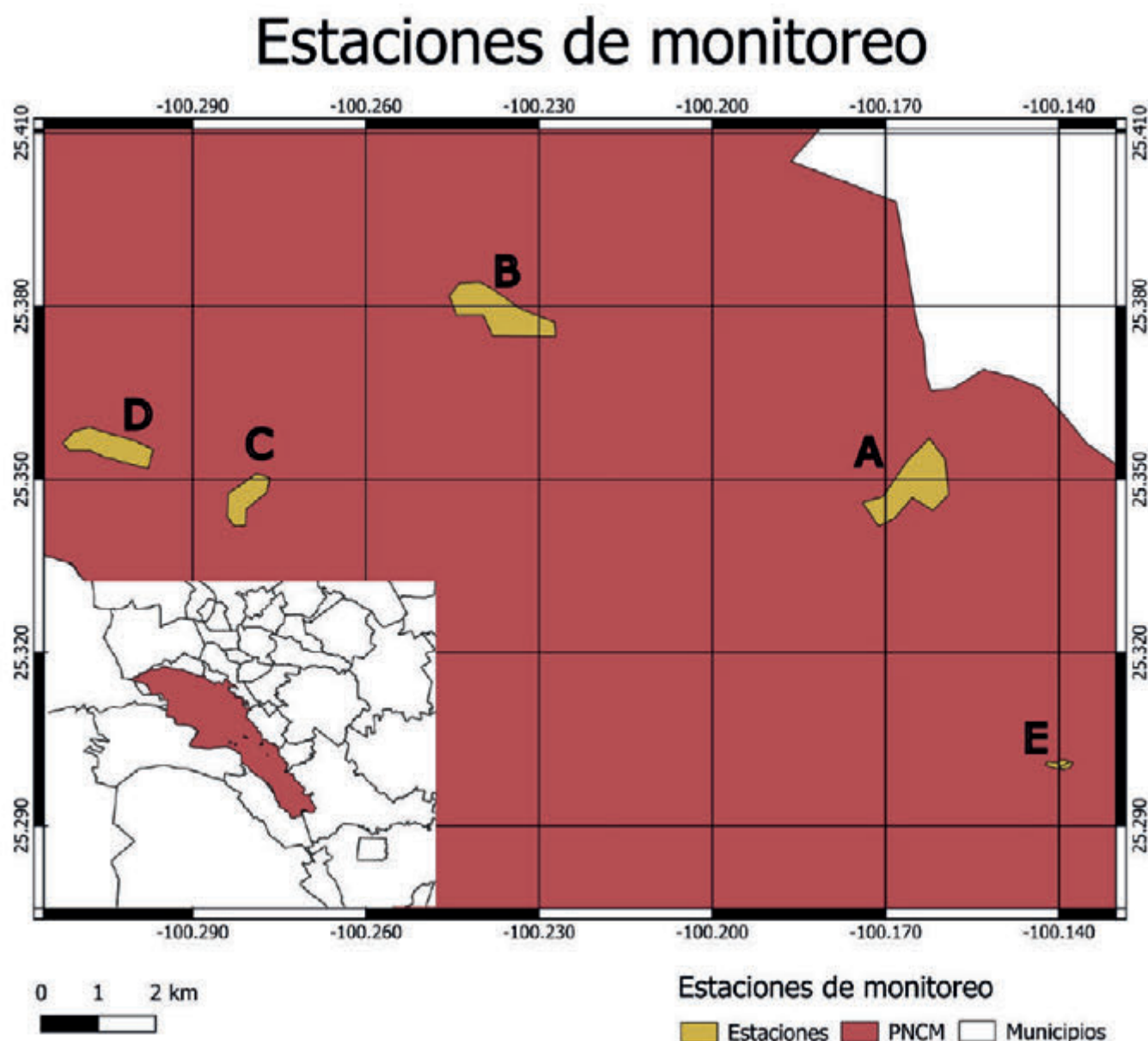


Figura 1. Mapa indicando las cinco estaciones de monitoreo seleccionadas: A) Potrero de Serna; B) La Ciénega de González; C) San Isidro; D) Laguna de Sánchez; E) Las Adjuntas

dentro del municipio de Santiago, y a través de un análisis de riesgo, evaluamos la importancia que sus impactos podrían representar para la conservación del ANP.

2. ÁREA DE ESTUDIO

el trabajo se realizó en cinco comunidades del PNCM, en la región fisiográfica de la Sierra Madre Oriental, dentro de las delimitaciones de Santiago, Nuevo León, siendo el segundo municipio con mayor extensión dentro del ANP con 53,137 Has (Esparza-Hernández, 2014) y con el mayor número de comunidades humanas (Aragón-Palacios, 2013). Las comunidades seleccionadas fueron: Potrero de Serna (La Nogalera), La Ciénega de González, San Isidro, Laguna de Sánchez y Ejido Los Mauricios (Las Adjuntas) (Figura 1). Las comunidades se seleccionaron por tener el mayor número de habitantes, y/o por su importancia

para el ecoturismo en la región según el criterio de Sánchez-Crispín *et al.* (2018).

El municipio de Santiago cuenta con nueve tipos de vegetación según la clasificación de Valdez-Tamez (2002). En el área de estudio destacan el matorral submontano, bosque de encino y bosque de pino-encino, así como sus respectivas zonas de transición (Alanís-Flores & Velazco-Macías, 2012). Todas las comunidades se encontraban en un gradiente altitudinal entre los 869 y los 1894 metros sobre el nivel del mar (msnm). El PNCM alberga alrededor de 1,368 especies de flora y fauna, de las cuales 29 son endémicas y 98 están incluidas en la Norma Oficial Mexicana NOM-059-SEMARNAT-2010. Setenta y tres están catalogadas en peligro de extinción y 71 en la Lista Roja de Especies Amenazadas de la IUCN (Uvalle-Sauceda *et al.*, 2013). Además, representa un hábitat de importancia para especies migratorias (Esparza-Hernández, 2014; Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo [PNUD], 2017).

3. METODOLOGÍA

3.1 MONITOREO DE PRESENCIA/AUSENCIA

Se realizó un muestreo sistemático desde enero de 2020 hasta junio de 2021 mediante el método de transectos fijos (Arévalo, 2001) para registrar cuáles especies de mamíferos exóticos estaban presentes en el área de estudio. El transecto principal fue de 33.2 kilómetros (km) de longitud y se recorrió en vehículo en todas las visitas, registrando los avistamientos directos de especies de mamíferos exóticos. Además, por cada estación de monitoreo se seleccionaron cuatro transectos donde se colocaron cuatro cámaras trampa con una separación de 0.5 a 1 km de distancia entre cada una por una duración de 30 días en cada comunidad, siguiendo el método de trampeo oportunista (Maffei *et al.*, 2002) y el de criterio a juicio de experto considerando los sitios en donde fuera más probable registrar el paso de estas especies, para podernos ajustar a las limitaciones debido a la alta cantidad de previos privados dentro de las estaciones de monitoreo. Todos los registros obtenidos fueron recopilados en una base de datos relacional generada con el programa Microsoft Excel®.

3.2 ANÁLISIS DE RIESGO

Para evaluar el riesgo de cada especie, se utilizó la metodología de Baptiste *et al.* (2010), que consistió en dos etapas. La primera fue una preevaluación que indicó si la especie era candidata para realizar el análisis, a lo que todas las especies encontradas cumplieron el criterio. Posteriormente, se les realizó la evaluación del riesgo, la cual se definió mediante una serie de preguntas divididas en 3 secciones que abarcan aspectos del riesgo de establecimiento (A), el potencial de impacto (B) y el manejo de cada especie (C). Estas preguntas se respondieron y documentaron con fuentes científicas avaladas, y tienen un valor ya establecido. En los casos en los que no se cuente con suficiente información, se toma en cuenta un porcentaje de incertidumbre; sin embargo, en este trabajo todas pudieron ser respondidas con éxito. Finalmente, se calculó un promedio final a partir de los valores de las preguntas, el cual asignó el nivel de riesgo general de la especie evaluada. Este puede ser un valor en el intervalo de 0 a 5, siendo 5 el nivel más alto de riesgo (Tabla 1).

Tabla 1. Niveles de riesgo asignados según la metodología de análisis de riesgo de Baptiste *et al.* (2010).

Valor	Nivel de riesgo
Mayor a tres y medio (> 3.5)	Riesgo alto
Mayor a tres (> 3 hasta 3.5)	Requiere mayor análisis
Mayor a dos (> 2 hasta 3)	Riesgo moderado
Igual o menor a dos (≤ 2)	Riesgo bajo

Figura 2. Perro doméstico (*Canis lupus familiaris*) captado mediante una cámara trampa en un sitio de monitoreo de la comunidad de Potrero de Serna.



Bushnell® 51°F / 11°C PIR 04/09/2019 06:17:47

4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 PERRO DOMÉSTICO

(*CANIS LUPUS FAMILIARIS* LINNAEUS 1758)

Total del análisis de riesgo: **3.8**

Nivel de riesgo: **RIESGO ALTO**

4.1.2 RESULTADOS DEL MONITOREO

En total se lograron acumular 140 días de monitoreo con cámaras trampa y 19 visitas al área de estudio en las que se registraron 279 individuos. Esta especie fue la única que se registró en todas las localidades visitadas, tanto de manera residente en domicilios o desplazándose en las zonas naturales, como acompañando a turistas. Al registrar el estado de libertad o cautiverio de los individuos, se observó que el 84.5% de los individuos se encontraban sin restricciones físicas que impidieran su dispersión.

4.1.3 ANÁLISIS DE RIESGO

SECCIÓN A - RIESGO DE ESTABLECIMIENTO: 4.9

Pertenece al orden Carnívora; sin embargo, son animales generalistas y oportunistas con una alta capacidad depredadora y adaptable a entornos urbanos, rurales y silvestres. Su dieta puede también incluir materia vegetal y huevos de distintas especies (Gompper, 2013). Tienen una alta eficacia reproductiva. Las hembras pueden presentar dos estros al año, con camadas que oscilan entre los 3 hasta los 10 individuos en promedio (Sánchez-Riquelme & Arias-Ruiz, 2017).

Son una de las especies introducidas con mayor distribución a nivel global. Está íntimamente ligada al hombre y ha sido reportada en casi todas las áreas naturales del país (Aguirre-Muñoz *et al.*, 2013). Existen numerosos reportes de la capacidad de invasión de los perros ferales en áreas protegidas de todo el

mundo (Gompper, 2013). Mientras que la capacidad de dispersión de esta especie puede ser altamente influenciada por su estado de domesticación (Rodríguez-León & López-Arévalo, 2019), se ha demostrado en diversos estudios una alta capacidad de dispersión de los individuos sin restricción de movimiento, así como de los perros en estado feral; a pesar de no tener patrones de migración (Duarte *et al.*, 2016). Se han registrado rangos de hasta más de 900 ha con un alcance de hasta 30 km en Gran Bretaña (Meek, 1999), y más de 104 ha en Australia (Dürr & Ward, 2014).

SECCIÓN B – IMPACTOS: 4.7

Los perros domésticos tienen una alta capacidad de hibridación con otros cánidos. Se han presentado casos en distintas partes del mundo, ya sea de manera intencional o no intencional, como el lobo mexicano (*Canis lupus baileyi*) en México (Valadez-Azúa *et al.*, 2002) y el coyote (*Canis latrans*) en Estados Unidos de América (EUA) (Caragiulo *et al.*, 2022). Esta última especie se encuentra presente en el PNCM. La hibridación con especies nativas ocasiona consecuencias negativas al aumentar la capacidad de adaptación de las especies invasoras al ambiente y generar individuos más agresivos (Badii & Landeros, 2007).

En cuanto a la competencia por recursos, existen registros con carnívoros como el lince (*Lynx rufus*), coyote (*Canis latrans*), puma (*Puma concolor*) y oso negro (*Ursus americanus*), entre otros (Gompper, 2013). Todas estas especies habitan el PNCM (Iverson, 1978) y su desplazamiento puede promover la proliferación sin control de presas que pueden impactar negativamente al ecosistema (Aguirre-Muñoz *et al.*, 2013). La conducta de marcaje territorial de los perros también desplaza a otras especies por medio de la intimidación (Zapata-Ríos & Branch, 2016) y/o su sola presencia ha demostrado tener un impacto negativo en la abundancia y diversidad

de aves por miedo y estrés (Doherty *et al.*, 2017). Esto puede afectar directamente al ecosistema a través de la afectación de especies clave para la conservación, que actúan como controladores de especies vegetales o dispersoras de semillas.

Además, existen numerosas enfermedades documentadas que son transmitidas por perros hacia el hombre y las especies de producción. La zoonosis de mayor importancia a nivel mundial es la rabia, destacando que el 99% de los casos en humanos son transmitidos a través del perro (Hughes & Macdonald, 2013). En el caso de la fauna nativa, presenta un alto riesgo de contagio por diferentes patógenos y/o ectoparásitos de los perros (Knobel *et al.*, 2014). Esto es de especial consideración para el PNCM, el cual, además de albergar numerosas comunidades humanas, se encuentra adyacente a la mancha urbana y zonas de transición en donde los cánidos domésticos pueden entrar en contacto con la fauna nativa (Cantú-Ayala *et al.*, 2013) (Figura 3). Estos impactos pueden ser severos, como el caso del hurón de patas negras (*Mustela nigripes*) que se encontró al borde de la extinción por una epidemia de distemper canino (Gompper, 2013). Además, el riesgo no se limita a mamíferos, como es el caso de presencia de *Mycoplasma* en tortugas del desierto (*Gopherus agassizii*) (Suzán & Ceballos, 2005; Álvarez-Romero *et al.*, 2008).

Las poblaciones humanas también pueden encontrarse en riesgo. En diferentes partes del mundo se han registrado ataques de perros en condición de calle o ferales a humanos, en ocasiones provocando la muerte de las personas en cuestión. En EUA se calculó una media de 11 a 14 muertes por año a causa de ataques de perros, sobre todo de niños, y un aproximado de 4.7 millones de personas atacadas, de las cuales 800,000 requirieron atención médica (Pimentel *et al.*, 2000). En México, se han registrado ataques a personas, así como un incremento en los reportes de las jaurías silvestres, resaltando algunos en áreas cercanas al PNCM (Flores, 2017; Gudiño, 2019).

Finalmente, el costo de todos estos impactos es alto. Tan solo en el 2009, en EUA se estimó un costo anual por daños ocasionados por perros ferales de >\$620 millones de dólares (Bergman *et al.*, 2009). Esta especie también genera pérdidas en las actividades económicas que se llevan a cabo en las áreas naturales. Dentro del PNCM, el ataque de perros se encuentra registrado como una de las principales causas de pérdida de ganado (Ortiz-Hernández *et al.*, 2013). Finalmente, representan una pérdida sustancial en el sector salud, reportándose pérdidas de alrededor de 250 millones de dólares al año en EUA (Pimentel *et al.*, 2000).



Figura 3. Traslapo del territorio de cánidos introducidos y nativos. A) Zorra gris (*Urocyon cinereoargenteus*) registrada por una cámara trampa en la comunidad de Laguna de Sánchez. B) Perro doméstico (*Canis lupus familiaris*) registrado en el mismo sitio de muestreo.



4.2 GATO DOMÉSTICO

(*FELIS SILVESTRIS CATUS* LINNAEUS 1758)

Total análisis de riesgo: **3.6**

Nivel de riesgo: **RIESGO ALTO**

4.2.2 RESULTADOS DEL MONITOREO

En 140 días de monitoreo acumulados en cámaras trampa y 19 visitas al área de estudio, se registraron un total de 26 ejemplares. La mayoría se encontraba en domicilios de comunidades rurales; sin embargo, fue posible registrar individuos caminando en zonas silvestres alejadas de los núcleos humanos. Todos los registros de esta especie consistieron en animales sin ningún tipo de restricción física que impidiera su dispersión en el área (Figura 4).

4.2.3 ANÁLISIS DE RIESGO

SECCIÓN A – RIESGO DE ESTABLECIMIENTO: 4.8

Los gatos domésticos pertenecen al orden Carnívora y son excelentes depredadores generalistas; se adecuan a las presas que se encuentren disponibles (Álvarez-Romero & Medellín, 2005). Es una especie con una tasa reproductiva sumamente exitosa. Son

poliétricas estacionales con un promedio de cuatro crías; sin embargo, puede variar desde una a ocho. Su reproducción se limita a dos camadas por año. Tienen la particularidad de entrar en proestro una vez parida la camada; lo que permite que puedan volver a gestar una vez se lleva a cabo el destete o si se pierde la camada (Álvarez-Romero & Medellín, 2005; Brito *et al.*, 2019).

Son una de las mayores especies invasoras a nivel mundial, destacando su papel como depredadores en zonas ricas en biodiversidad. Destaca su presencia en islas, en donde se han realizado campañas para su erradicación (Álvarez-Romero & Medellín, 2005); así como en diferentes países con una amplia diversidad climática (Nogales *et al.*, 2004; Borroto-Páez & Mancina, 2017). Esta especie fue introducida en todos los países del mundo a partir de su función como controlador de plagas; sin embargo, en los últimos años se ha popularizado como animal de compañía. Tan solo en EUA, se calculó que el número de gatos domésticos se triplicó durante los últimos 40 años, y se considera que a nivel mundial existen alrededor de 600 millones de gatos (Dauphiné & Cooper, 2009). En México, es una especie distribuida a lo largo de todo



Figura 4. Gato doméstico (*Felis silvestris catus*) registrado en la comunidad de Ciénega de González como animal de compañía, sin restricción para su dispersión.

el territorio nacional (Álvarez-Romero & Medellín, 2005).

Es una especie con una gran capacidad de dispersión, recorriendo grandes distancias independientemente de su clasificación como gato doméstico o feral. Se conoce que las distancias recorridas son mayores en la noche que en el día, además de que este rango es condicionado por la disponibilidad de recursos, así como por el sexo del ejemplar. Tienen un impacto destacado en ecosistemas insulares, registrándose rangos de hasta más de 1,000 hectáreas en las islas mexicanas (Langham & Porter, 1991; Luna-Mendoza *et al.*, 2011; Recio & Seddon, 2013).

SECCIÓN B – IMPACTOS: 4.5

Es un depredador altamente efectivo y compite por el alimento con otras especies depredadoras. Su dieta se compone de pequeños mamíferos, reptiles y anfibios. Los gatos ferales compiten por hábitat con estas mismas especies, ya que comúnmente se encuentran en áreas alejadas de los asentamientos humanos para evitar el contacto con estos (Dauphiné & Cooper, 2009; Mella-Méndez, 2019).

Presentan un patrón de depredación independiente de su clasificación en gatos de hogar, callejeros o ferales (Mella-Méndez, 2019). Son responsables de las extinciones de alrededor de 63 vertebrados silvestres en el mundo, encontrándose grupos diversos como aves (40 especies), reptiles (dos especies) y pequeños mamíferos (21 especies) (Dauphiné & Cooper, 2009; Mella-Méndez, 2019). Esto a su vez provoca un impacto indirecto al hábitat por la pérdida de funciones ecológicas, como la dispersión de semillas por medio de las aves. Este es el grupo más vulnerable ante la depredación por gatos. (Dauphiné & Cooper, 2009; Álvarez-Romero *et al.*, 2008; Danner *et al.*, 2010).

También es una especie con alto riesgo de transmisión de enfermedades zoonóticas de gran importancia, así como de transmisión de enfermedades a diferentes especies animales silvestres y domésticas. Son portadores de patógenos de alta importancia como el protozoo *Toxoplasma gondii*, transmitido a todos los mamíferos, incluido el ser humano. Estudios recientes han identificado la presencia de este parásito no solamente en especies terrestres sino también en mamíferos marinos como delfines y focas (Hollings *et al.*, 2013). Así mismo, los gatos de libre albedrío pueden entrar en contacto directo con diferentes especies silvestres como los murciélagos, que transmiten enfermedades de alta importancia como la rabia, que pueden llegar al ser humano. Se han presentado casos fatales de rabia en México a causa de mordeduras de gato (Cruz-Reyes, 2009; Milenio Política, 2024). Además

del ser humano, los gatos pueden transmitir otros virus de importancia para los felinos silvestres como el virus de inmunodeficiencia felina (FIV) y la panleucopenia felina (Fix *et al.*, 1989; Álvarez-Romero & Medellín, 2005; Cruz-Reyes, 2009; Duffy & Capece, 2012). El PNCM alberga las seis especies de felinos de México (González-Saldívar *et al.*, 2013), incluido el jaguar (*Panthera onca*), especie con especial interés en su conservación debido a sus poblaciones en peligro de extinción en México (Carrera-Treviño *et al.*, 2016), por lo que estas enfermedades son un riesgo latente para el éxito en su conservación.

Finalmente, los impactos económicos en las actividades pecuarias son importantes, ya que existen registros de que un solo individuo de gato feral puede llegar a depredar hasta 46 gallinas (Borroto-Páez & Reyes-Pérez, 2018). Así mismo, se han realizado estudios sobre el impacto económico de la depredación de aves nativas, aplicando metodologías que calculan el valor de los individuos de una especie en función del costo de oportunidad de los observadores de aves, cazadores y especialistas. La conclusión fue que el impacto depredador de los gatos tiene un costo aproximado de \$14 billones de dólares anuales (Pimentel *et al.*, 2000). Extrapolando esta situación a la riqueza biológica del PNCM y su elevado número de endemismos, se puede inferir el alto impacto económico sobre la actividad de observación de aves en el ANP (Sahagún-Sánchez & Durán-Fernández, 2017). Además, las estrategias de manejo representan un gasto elevado, registrando costos de hasta \$350,000 dólares solamente en programas de erradicación en Islas (Aguirre-Muñoz *et al.* 2013).

SECCIÓN C – MANEJO: 2

La erradicación de gatos ferales y control poblacional de gatos domésticos es una prioridad en algunas reservas naturales de México y el mundo, sobre todo en islas. Existen casos de éxito en las islas Todos Santos, Montserrat y Coronados, entre otras (Ortiz-Alcaraz *et al.*, 2017). Las técnicas utilizadas varían debido a que estas se seleccionan de manera que no afecten a la fauna nativa de la región. Las más utilizadas son el uso de trampas de cebo de cojinete y trampas letales, así como el rifle sanitario. Sin embargo, se han empleado otras como la captura y traslado a continente, el trampeo con aplicación de anestesia y posterior eutanasia para asegurar un trato ético de los ejemplares (Aguirre-Muñoz *et al.*, 2013).

En el caso de los ecosistemas continentales, estos esfuerzos son más complicados debido a que el control y monitoreo de poblaciones son más difíciles de llevar a cabo por la capacidad de dispersión de los ejemplares, además de la creciente simpatía de la población por la

especie. En ocasiones solo se limita a programas como el “Trap-Neuter-Release” (atrapar, esterilizar y soltar); sin embargo, se ha demostrado que estas estrategias sólo funcionan para colonias pequeñas urbanizadas y no evitan la problemática de depredación de especies nativas ni la transmisión de enfermedades; sin contar

con que suponen un costo sumamente elevado en recursos de tiempo y dinero (Foley *et al.*, 2005; Duffy & Capece, 2012). Dentro del PNCM, la extensión territorial amplia, así como la falta de recursos dirigidos, podrían complicar los esfuerzos de control, por lo que su manejo representaría desafíos sustanciales.

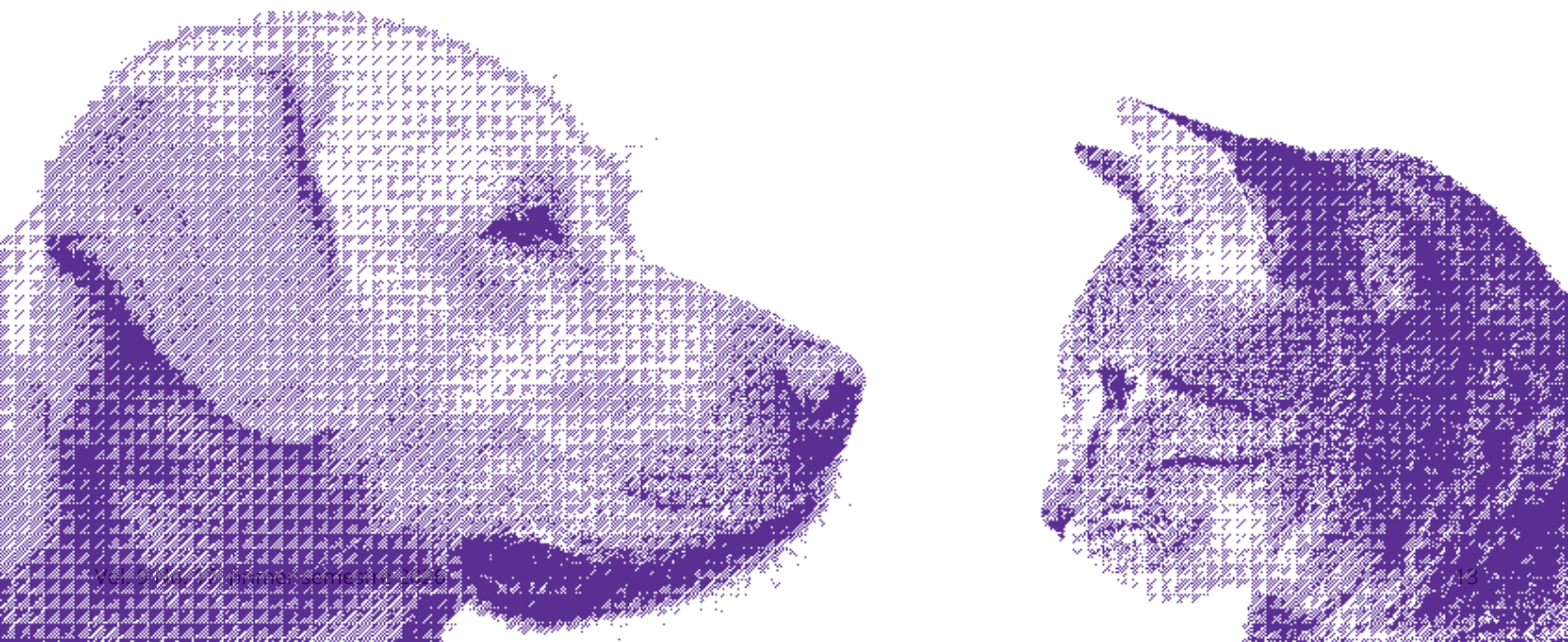
5. CONCLUSIÓN

La presencia de perros y gatos, sobre todo aquellos individuos sin restricción de movimiento, representan un riesgo real para la biodiversidad de las áreas que colonizan, incluso en los ambientes transformados por la acción humana (Instituto Mexicano para la Tecnología del Agua [IMTA] *et al.*, 2007). El gato doméstico incluso se encuentra en la lista de las 100 especies exóticas invasoras más dañinas del mundo (Lowe *et al.*, 2004).

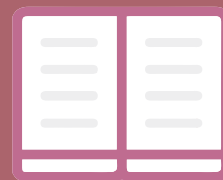
A través de metodologías como el análisis de riesgo, se evidencia que las poblaciones ferales y sin control de ambas especies representan una amenaza directa a los esfuerzos de conservación que se llevan a cabo en zonas de alta importancia biológica y cultural como lo es el Parque Nacional Cumbres de Monterrey. Por lo anterior, es imperativa la necesidad de una estrategia de control o remediación, para prevenir o frenar cualquier impacto sustancial que ya pueda estar manifestándose dentro del área de estudio y en toda la extensión del ANP. Esto, a través de la actualización e implementación del Plan de Manejo ya publicado, así como mediante el fomento de la participación comunitaria mediante estrategias de concientización y educación.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen ampliamente el apoyo de la Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (CONANP), así como a las comunidades residentes del Parque Nacional Cumbres de Monterrey y a la Dra. María Piedad Baptiste Espinosa por su apoyo y contribuciones brindadas en la realización de este trabajo.



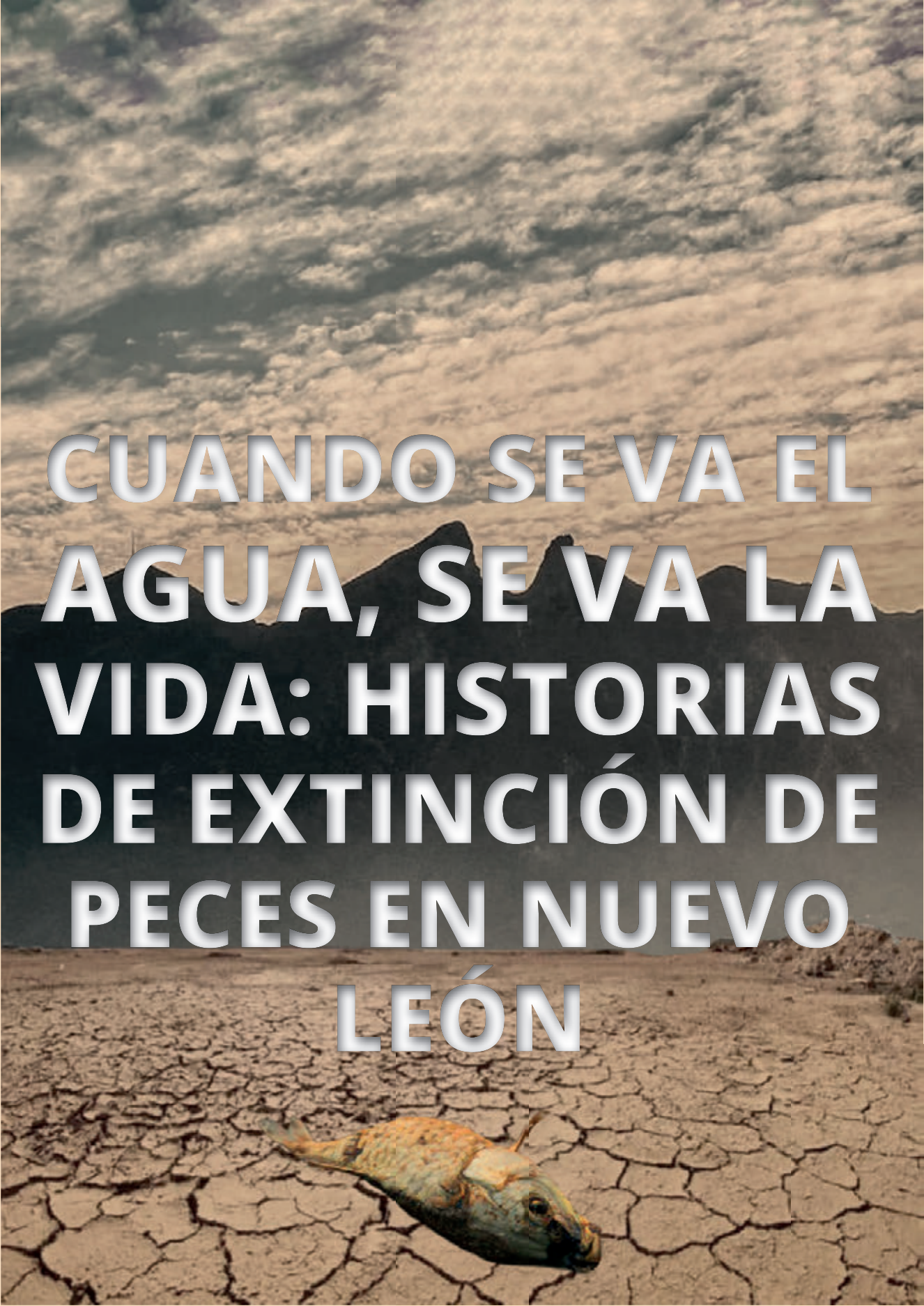
Literatura citada



- Aguirre-Muñoz, A., Alfaro, M., Gutiérrez, E., & Morales, S. 2009. Especies exóticas invasoras: impactos sobre las poblaciones de flora y fauna, los procesos ecológicos y la economía. Capital natural de México, vol. II: Estado de conservación y tendencias de cambio. Sarukhán, J. (Coord. gen.) p. 277-318. <https://bioteca.biodiversidad.gob.mx/janium/Documentos/7404.pdf>
- Aguirre-Muñoz, A., Méndez-Sánchez, F., De la Rosa-Conroy, L., La-towski-Robles, M. y Manríquez-Ayub, A. 2013. Diagnóstico de especies exóticas invasoras en las Reservas de la Biosfera y Áreas Naturales Protegidas (ANP) insulares seleccionadas, a fin de establecer actividades para el manejo de las mismas. Tercer informe de actividades presentado a la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad dentro de la fase preparatoria del proyecto GEF "Aumentar las capacidades de México para manejar especies exóticas invasoras a través de la implementación de la Estrategia Nacional de Especies Invasoras". Grupo de Ecología y Conservación de Islas, A.C., Ensenada, Baja California, México. 128 pp. https://www.biodiversidad.gob.mx/media/1/especies/Invasoras/files/1.4_Consultoria_Diagnostico_Islas.pdf
- Alanís-Flores, G. y C. Velasco-Macías. 2013. Tipos de Vegetación, en: Cantú-Ayala et al. (eds.), Historia Natural del Parque Nacional Cumbres de Monterrey, México. UANL-CONANP. México. Pp. 117-126.
- Álvarez-Romero, J. y Medellín, R. A. 2005. *Felis silvestris*. Vertebrados superiores exóticos en México: diversidad, distribución y efectos potenciales. Instituto de Ecología, Universidad Nacional Autónoma de México. Bases de datos SNIB-CONABIO. Proyecto U020. México. D.F. <http://www.conabio.gob.mx/conocimiento/exoticas/fichaexoticas/Felissilvestris00.pdf>
- Álvarez-Romero, J. G., Medellín, R. A., Oliveras de Ita, A., Gómez de Silva, H. y Sánchez, O. 2008. Animales exóticos en México: una amenaza para la biodiversidad. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, Instituto de Ecología, UNAM, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, México, D.F., 518 pp. https://www.researchgate.net/publication/260871441_Animales_exoticos_en_Mexico_una_amenaza_para_la_biodiversidad
- Aragón-Palacios, J. 2013. Amenazas Demográficas Potenciales, en: Cantú-Ayala et al. (eds.), Historia Natural 22 del Parque Nacional Cumbres de Monterrey, México. UANL-CONANP. México. Pp. 253-260.
- Arévalo, J. 2001. Manual de campo para el monitoreo de mamíferos terrestres en áreas de conservación. Asociación Conservacionista Monteverde. P.18. https://www.academia.edu/8849187/MANUAL_DE_CAMPO_PARA_EL_MONITOREO_DE_MAMIFEROS_TERRESTRES_EN_AREAS_DE_CONSERVACION
- Badii, M. H., & Landeros, J. 2007. Invasión de especies o el tercer jinete de apocalipsis ambiental, una amenaza a la sustentabilidad (Invasive species or the third horseman of environmental apocalypses, a threat to sustainability). *International Journal of Good Conscience*. 2(1): 39-53. [http://spentamexico.org/v2-n1/2\(1\)%2039-53.pdf](http://spentamexico.org/v2-n1/2(1)%2039-53.pdf)
- Bao, K. J., & Schreer, G. 2016. Pets and Happiness: Examining the Association between Pet Ownership and Wellbeing. *Anthrozoös*, 29(2), 283-296. <https://doi.org/10.1080/08927936.2016.1152721>
- Baptiste, M.P., Castaño, N., Cárdenas, D., Gutiérrez, F. P., Gil, D.L. y Lasso, C.A. (eds). 2010. Análisis de riesgo y propuesta de categorización de especies introducidas para Colombia. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt. Bogotá, D. C., Colombia. 200 p. https://www.researchgate.net/publication/317236210_Analisis_de_Riesgo_y_Propuesta_de_Categorizacion_de_Especies_Introducidas_para-Colombia
- Bergman, D., Breck, S. W., & Bender, S. 2009. Dogs gone wild: feral dog damage in the United States. USDA National Wildlife Research Center – Staff Publications. Pp. 862. <https://digitalcommons.usu.edu/wdmconference/2009/session6/1/>
- Borroto-Páez, R., & Mancina, C. A. 2017. Biodiversity and conservation of Cuban mammals: past, present, and invasive species. *Journal of Mammalogy*, 98(4), 964-985. <https://doi.org/10.1093/jmammal/gyx017>
- Borroto-Páez, R., & Reyes-Pérez, D. 2018. Predation impacts by a single feral cat in a Cuban rural farm. *Poeyana*, 56, 53-55. <https://revistasgeotech.com/index.php/poey/article/view/234/348>
- Brito, I. M., García, Y. L., & Fernández, L. B. 2019. La reproducción de la gata doméstica. *Anuario Ciencia en la UNAH*, 17(1). <https://revistas.unah.edu.cu/index.php/ACUNAH/article/view/1147/2683>
- Camargo-Ortega, B. A., & Vaquero-Molina, A. 2021. Entre el discurso y la práctica: la incongruencia en el desarrollo del ecoturismo en el Parque Nacional Cumbres de Monterrey, Nuevo León. En: *El desarrollo turístico en México. Revisión general y casos de estudio* (pp. 319-347). Universidad de Guadalajara. <https://publicaciones.udg.mx/gpd-el-desarrollo-turistico-en-mexico-9786075713403-637fed7b350bc.html>
- Carrera-Treviño, R., Cavazos, J. J., Briones-Salas, M., & Lira-Torres, I. 2016. Registro actual del jaguar *Panthera onca* (Carnivora: Felidae) en el Parque Nacional Cumbres de Monterrey, Nuevo León, México. *Revista mexicana de biodiversidad*, 87(1), 270-275. <https://doi.org/10.1016/j.rmb.2016.01.023>
- Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (CONANP). 2014. Programa de Adaptación al Cambio Climático del Complejo Cumbres de Monterrey- Sierra de Arteaga- Zapalimé. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales y Fondo Mexicano para la Conservación de la Naturaleza. México. p. 60. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/247259/PACC_Cumbres_Monterrey.pdf
- Cruz-Reyes, A. 2009. Fauna feral, fauna nociva y zoonosis. *Biodiversidad del ecosistema del Pedregal de San Angel*. Sección: restauración, conservación y manejo, 453-461. http://www.repsa.unam.mx/documentos/Cruz-Reyes_2009_faunas_feral.pdf
- Danner, R. M., Farmer, C., Hess, S. C., Stephens, R. M., & Banko, P. C. 2010. Survival of Feral Cats, *Felis catus* (Carnivora: Felidae), on Mauna Kea, Hawai'i, Based on Tooth Cementum Lines1. *Pacific Science*, 64(3), 381-389. <https://doi.org/10.2984/64.3.381>
- Dauphiné, N., & Cooper, R. J. 2009. Impacts of free-ranging domestic cats (*Felis catus*) on birds in the United States: a review of recent research with conservation and management recommendations. In Proceedings of the fourth international partners in flight conference: tundra to tropics (Vol. 205). https://hahf.org/wp-content/uploads/media-1/Bird-impacts_of_free_ranging_domestic_cats.pdf

- Doherty, T. S., Dickman, C. R., Glen, A. S., Newsome, T. M., Nimmo, D. G., Ritchie, E. G., & Wirsing, A. J. 2017. The global impacts of domestic dogs on threatened vertebrates. *Biological conservation*, 210, 56-59. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2017.04.007>
- Doherty, T. S., Glen, A. S., Nimmo, D. G., Ritchie, E. G., & Dickman, C. R. 2016. Invasive predators and global biodiversity loss. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 113(40), 11261-11265. <https://doi.org/10.1073/pnas.1602480113>
- Duarte, J., García, F. J., & Fa, J. E. 2016. Depredatory impact of free-roaming domestic dogs on Mediterranean deer in southern Spain: implications for human-wolf conflict. *Folia Zoologica*, 65(2), 135-141. <https://doi.org/10.25225/fozo.v65.i2.a8.2016>
- Duffy, D. C., & Capece, P. 2012. Biology and impacts of Pacific Island invasive species. 7. The domestic cat (*Felis catus*) 1. *Pacific Science*, 66(2), 173-212. <https://doi.org/10.2984/66.2.7>
- Dürr, S., & Ward, M. P. 2014. Roaming behaviour and home range estimation of domestic dogs in Aboriginal and Torres Strait Islander communities in northern Australia using four different methods. *Preventive veterinary medicine*, 117(2), 340-357. <https://doi.org/10.1016/j.prevetmed.2014.07.008>
- Esparza-Hernández, L.G. 2014. Estudio del manejo y conservación del Parque Nacional Cumbres de Monterrey (PNCM), según decreto del 2000 bajo un enfoque de desarrollo sustentable basado en la participación ciudadana. Tesis doctoral, Universidad Autónoma de Nuevo León. <http://eprints.uanl.mx/4057/1/1080253674.pdf>
- Fix, A. S., Riordan, D. P., Hill, H. T., Gill, M. A., & Evans, M. B. 1989. Feline panleukopenia virus and subsequent canine distemper virus infection in two snow leopards (*Panthera uncia*). *Journal of Zoo and Wildlife Medicine*, 273-281. <https://www.jstor.org/stable/20094961>
- Flores, R. 25 de febrero de 2017. Crecen ataques de perros ferales. Zócalo. Recuperado de https://www.zocalo.com.mx/new_site/articulo/crecen-ataques-de-perros-ferales
- Foley, P., Foley, J. E., Levy, J. K., & Paik, T. 2005. Analysis of the impact of trap-neuter-return programs on populations of feral cats. *Journal of the American Veterinary Medical Association*, 227(11), 1775-1781. <https://doi.org/10.2460/javma.2005.227.1775>
- Gompper, M. E. (Ed.). 2013. Free-ranging dogs and wildlife conservation. Oxford University Press.
- González-Saldívar, F., Uvalle-Sauceda, J., Avendaño, J. y Niño-Ramírez, A. 2013. Mamíferos, en: Cantú-Ayala et al. (eds.), Historia Natural del Parque Nacional Cumbres de Monterrey, México. UANL-CONANP. México. Pp. 237-251.
- Gudiño, A. 2 de febrero del 2019. Perros atacan y matan a mujer en Tecámac, Edomex. Milenio. Recuperado de <https://www.milenio.com/policia/jauria-perros-causo-muerte-mujer-tecamac>
- Hollings, T., Jones, M., Mooney, N., & McCallum, H. 2013. Wildlife disease ecology in changing landscapes: mesopredator release and toxoplasmosis. *International Journal for Parasitology: Parasites and Wildlife*, 2, 110-118. <https://doi.org/10.1016/j.ijppaw.2013.02.002>
- Hughes, J., & Macdonald, D. W. 2013. A review of the interactions between free-roaming domestic dogs and wildlife. *Biological Conservation*, 157, 341-351. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2012.07.005>
- Instituto Mexicano para la Tecnología del Agua (IMTA), Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO), GECI, Aridamérica, The Nature Conservancy. 2007. Especies Invasoras de Alto Impacto a la Biodiversidad. Prioridades en México. Jiutepec, Morelos. <http://repositorio.imta.mx/handle/20.500.12013/1619>
- Iverson, J. B. 1978. The impact of feral cats and dogs on populations of the West Indian rock iguana, *Cyclura carinata*. *Biological Conservation*, 14(1), 63-73. [https://doi.org/10.1016/0006-3207\(78\)90006-X](https://doi.org/10.1016/0006-3207(78)90006-X)
- Knobel, D. L., Butler, J. R., Lembo, T., Critchlow, R., & Gompper, M. E. 2014. Dogs, disease, and wildlife. En: *Free-ranging dogs and wildlife conservation*, 144, Pp.169.
- Kreplins, T. L., Kennedy, M. S., Adams, P. J., Bateman, P. W., Dundas, S. D., & Fleming, P. A. 2018. Fate of dried meat baits aimed at wild dog (*Canis familiaris*) control. *Wildlife Research*, 45(6), 528-538. <https://doi.org/10.1071/WR17182>
- Langham, N. P. E., & Porter, R. E. R. 1991. Feral cats (*Felis catus* L.) on New Zealand farmland. I. Home range. *Wildlife Research*, 18(6), 741-760. <https://doi.org/10.1071/WR9910741>
- Lowe S., Browne M., Boudjelas S., De Poorter M. 2004. 100 de las Especies Exóticas Invasoras más dañinas del mundo. Una selección del Global Invasive Species Database. Publicado por el Grupo Especialista de Especies Invasoras (GEI), un grupo especialista de la Comisión de Supervivencia de Especies (CSE) de la Unión Mundial para la Naturaleza (UICN), 12pp. <https://portals.iucn.org/library/sites/library/files/documents/2000-126-Es.pdf>
- Luna-Mendoza, L., Barredo-Barberena, J. M., Hernández-Montoya, J. C., Aguirre-Muñoz, A., Méndez-Sánchez, F. A., Ortiz-Alcaraz, A., & Félix-Lizárraga, M. 2011. Planning for the eradication of feral cats on Guadalupe Island, México: home range, diet, and bait acceptance. Island Invasives: Eradication and Management'. (Eds CR Veitch, MN Clout, and DR Towns.) pp, 192-197. https://www.researchgate.net/publication/266476695_Planning_for_the_eradication_of_feral_cats_on_Guadalupe_Island_Mexico_home_range_diet_and_bait_acceptance
- Maffei L., Cuéllar E., Noss A. 2002. Using camera-traps to assess mammals in the Chaco-Chiquitano ecotone. *Revista Boliviana Ecológica*, 11, 55-65. https://www.researchgate.net/publication/269709095_Uso_de_trampas-camara_para_la_evaluacion_de_mamiferos_en_el_ecotono_Chaco-Chiquitania
- Meek, P. D. 1999. The movement, roaming behaviour and home range of free-roaming domestic dogs, *Canis lupus familiaris*, in coastal New South Wales. *Wildlife Research*, 26(6), 847-855. <https://doi.org/10.1071/WR97101>
- Mella-Méndez, I. 2019. Depredación de Fauna Silvestre por Gatos Domésticos (*Felis catus*) en la Ciudad de Xalapa, Veracruz, México. (Tesis de maestría). Universidad Veracruzana, Xalapa, Veracruz, México.
- Nogales, M., Martín, A., Tershy, B. R., Donlan, C. J., Veitch, D., Puerta, N., Wood, B., & Alonso, J. 2004. A review of feral cat eradication on islands. *Conservation Biology*, 18(2), 310-319. <https://doi.org/10.1111/j.1523-1739.2004.00442.x>
- Orduña-Villaseñor, M., Valenzuela-Galván, D., & Schondube, J. E. 2023. Tus mejores amigos pueden ser tus peores enemigos: impactos de los gatos y perros domésticos en países megadiversos. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 94(1), 1. <https://doi.org/10.22201/ib.20078706e.2023.94.4850>
- Ortiz-Alcaraz, A., Aguirre-Muñoz, A., Arnaud, G., Galina-Tessaro, P., Rojas-Mayoral, E., Méndez-Sánchez, F., & Ortega-Rubio, A. 2017. Progress in the eradication of the feral cat (*Felis catus*) and recovery of the native fauna on Socorro Island, Revillagigedo Archipelago, Mexico. *Therya*, 8(1), 3-9. <https://doi.org/10.12933/therya-17-425>
- Ortiz-Hernández, S., Cantú-Ayala, C., Uvalle-Sauceda, J. y González-Saldívar, F. 2013. Actividades Pecuarias, en: Cantú-Ayala et al. (eds.), Historia Natural del Parque Nacional Cumbres de Monterrey, México. UANL-CONANP. México. Pp. 287-295. https://www.academia.edu/7441979/Libro_Historia_Natural_Parque_Nacional_Cumbres_Monterrey
- Pimentel, D., Lach, L., Zuniga, R., & Morrison, D. 2000. Environmental and economic costs of nonindigenous species in the United States. *BioScience*, 50(1), 53-65. [https://doi.org/10.1641/0006-3568\(2000\)050\[0053:EAECON\]2.3.CO;2](https://doi.org/10.1641/0006-3568(2000)050[0053:EAECON]2.3.CO;2)
- Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD). 2017. Estrategia de comunicación para prevenir, controlar y erradicar las especies exóticas invasoras (EEI) en el Parque Nacional Cumbres de Monterrey. Estrategia entregada

- a la CONABIO y al PNUD en el marco del proyecto GEF 00089333 Aumentar las Capacidades Nacionales para el Manejo de las Especies Exóticas Invasoras (EEI) a través de la Implementación de la Estrategia Nacional de EEI. González Pacheco, N.; Espinosa Cruz, S. E. y Gudiño Valdez, A. L., Ciudad de México, México. P. 79. https://www.biodiversidad.gob.mx/media/1/especies/Invasoras/files/comp2/5_Estrategia_de_comunicacion_PNCumbresMont.pdf
- Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA). 2012. GEO 5, Perspectivas del Medio Ambiente Mundial: Resumen para Responsables de Políticas. 1ª edición. P. 22. <https://sinia.minam.gob.pe/documentos/geo-5-perspectivas-medio-ambiente-resumen-responsables-politicas>
- Recio, M. R., & Seddon, P. J. 2013. Understanding determinants of home range behaviour of feral cats as introduced apex predators in insular ecosystems: a spatial approach. *Behavioral Ecology and Sociobiology*, 67(12), 1971-1981. <https://doi.org/10.1007/s00265-013-1605-7>
- Rodríguez-Galván, G., Zaragoza-Martínez, L., Chirino-Ovando, R., Zaragoza-Martínez, P., Ubierno-Corvalán, P., Sánchez-Gómez, P., & Camacho-Vallejo, E. 2018. Los animales domésticos locales para el estar bien de la familia rural. *Actas Iberoamericanas de Conservación Animal*, 52-58.
- Rodríguez-León, D., & López-Arévalo, H. 2019. Variación de la abundancia relativa de perros en un gradiente de presencia humana en dos reservas privadas (Tabio, Cundinamarca). *Acta Biológica Colombiana*, 24(2), 379-390. <http://dx.doi.org/10.15446/abc.v24n2.70608>
- Sahagún-Sánchez, F. J., & Durán-Fernández, A. 2017. El monitoreo de aves en el corredor ecológico de la Sierra Madre Oriental. In: Experiencias de monitoreo de aves en el corredor ecológico de la Sierra Madre Oriental, 11. Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas, Universidad de Guadalajara. Sahagún-Sánchez F., Huerta-Martínez F., Durán-Fernández A. (Coord). México. Pp. 11-20. https://www.researchgate.net/publication/323722427_Experiencias_de_monitoreo_de_aves_en_el_corredor_ecologico_de_la_Sierra_Madre_Oriental
- Sánchez-Crispín, Á., Alvarado-Sizzo, I., & Propin-Frejomil, E. 2018. Estructura territorial del turismo en Santiago, Nuevo León, México. *Investigaciones geográficas*, (97). <https://doi.org/10.14350/ig.59620>
- Sánchez-Riquelme, A., & Arias-Ruiz, F. 2017. Biología gestacional y predicción del parto en la perra. *Revista de Investigaciones Veterinarias del Perú*, 28(4), 771-783. <http://dx.doi.org/10.15381/rivep.v28i4.13865>
- Milenio Política. (24 de marzo del 2024). México reporta el primer caso de rabia en 19 años; hombre murió en Cancún. Milenio. <https://www.milenio.com/ciencia-y-salud/caso-rabia-19-anos-mexico-hombre-murio-cancun>
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT); Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (CONANP). (3 de enero de 2023). *Resumen del Programa de Manejo del Parque Nacional Cumbres de Monterrey* (Acuerdo). Diario Oficial de la Federación. México. https://www.dof.gob.mx/nota_to_pdf.php?edicion=MAT&fecha=03%2F01%2F2023
- Suzán G., Ceballos G. 2005. The role of feral mammals on wildlife infectious disease prevalence in two nature reserves within Mexico City limits. *Journal of Zoo and Wildlife Medicine*, 36(3):479-485. <https://doi.org/10.1638/04-078.1>
- Uvalle-Sauceda, J., Cantú-Ayala, C., González-Zaldívar, F. y Marmolejo-Monsiváis, J. 2013. Climas, en: Cantú-Ayala *et al.* (eds.), Historia Natural del Parque Nacional Cumbres de Monterrey, México. UANL-CONANP. México. Pp. 41-51. https://www.academia.edu/7441979/Libro_Historia_Natural_Parque_Nacional_Cumbres_Monterrey
- Valadez-Azúa, R., Rodríguez-Galicia, B., Viniegra-Rodríguez, F., Olmos-Jiménez, K., Blanco-Padilla, A., Tejeda-Vega, S., & Casas-Castillo, M. 2002. Híbridos de lobos y perros en cuevas teotihuacanas. Crónica de un descubrimiento.
- Valdez-Tamez, V. 2002. Desarrollo de Estrategias para la Preservación de la Diversidad Florística del Municipio de Santiago, Nuevo León, México. Tesis doctoral. Universidad Autónoma de Nuevo León, Monterrey, Nuevo León, México. <http://eprints.uanl.mx/id/eprint/5451>
- Weber, M. 2010. Perros (*Canis lupus familiaris*) y gatos (*Felis catus*) ferales en la Reserva de la Biosfera Los Petenes, Campeche, México: Diagnóstico, efectos en la fauna nativa y perspectivas de control. Informe final proyecto SDP-18-2008 PNUD-CONANP-ECOSUR. Campeche, México. https://www.researchgate.net/publication/234129343_Informe_Final_Proyecto_Perros_y_gatos_ferales_en_la_Reserva_de_la_Biosfera_Los_Petenes_Campeche_Diagnostico_efectos_en_la_fauna_nativa_y_perspectivas_de_control
- Zapata-Ríos, G., & Branch, L. C. 2016. Altered activity patterns and reduced abundance of native mammals in sites with feral dogs in the high Andes. *Biological Conservation*, 193, 9-16. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2015.10.016>



CUANDO SE VA EL AGUA, SE VA LA VIDA: HISTORIAS DE EXTINCIÓN DE PECES EN NUEVO LEÓN

/// LESLIE SARAÍ GONZÁLEZ RODRÍGUEZ, ANTONIO GUZMÁN VELASCO,
ANA LAURA LARA RIVERA

RESUMEN

La biodiversidad dulceacuícola en México enfrenta una disminución preocupante. Un gran porcentaje de las especies de peces dulceacuícolas mexicanas se encuentran en alguna categoría de riesgo de extinción, especialmente aquellas que son endémicas y con una distribución altamente restringida. En el estado de Nuevo León la situación es realmente alarmante. Manantiales como El Potosí se han secado de manera permanente, lo que ha llevado a la pérdida de su riqueza acuática, como el cachorrito del Charco Azul (*Cyprinodon inmemoriam*), especie ahora extinta. La pérdida continua de las poblaciones de peces podría afectar gravemente el equilibrio ecológico, por lo que es crucial tomar medidas de conservación para proteger los recursos hídricos.

ABSTRACT

The freshwater biodiversity in Mexico faces a concerning decline. A significant percentage of mexican freshwater fish species are in some category of extinction risk, especially those that are endemic and have highly restricted distribution. In the state of Nuevo León, the situation is truly alarming. Springs like El Potosí have permanently dried up, leading to the loss of their aquatic richness. The Charco Azul Pupfish (*Cyprinodon inmemoriam*), now extinct, serves as a clear example of this water crisis. The ongoing loss of fish populations could severely impact the ecological balance. Therefore, it is crucial to take conservation measures and protect our water resources.

“*MÉXICO ES UN PAÍS MEGADIVERSO*”, ES UNA FRASE AMPLIAMENTE UTILIZADA PARA DESCRIBIR LA GRAN DIVERSIDAD BIOLÓGICA EXISTENTE EN EL PAÍS. SIGNIFICA QUE MÉXICO OCUPA EL QUINTO LUGAR DEL MUNDO EN BIODIVERSIDAD, DEBIDO A SU POSICIÓN PRIVILEGIADA ENTRE LA REGIÓN NEÁRTICA Y NEOTROPICAL, ADEMÁS DE SU HISTORIA GEOLÓGICA QUE CONTRIBUYÓ A LA FORMACIÓN DE HÁBITATS DIVERSOS CON CLIMAS TAN VARIADOS COMO LA RIQUEZA BIOLÓGICA QUE ALBERGAN” (ZAMBRANO, 2007).



Palabras clave: Biodiversidad, Extinción, Peces dulceacuícolas, Cyprinodontidos.

Keywords: Biodiversity, Cyprinodontidae Extinction, Freshwater fishes.

INTRODUCCIÓN

Mucha de la diversidad biológica en México se encuentra en las aguas continentales, que pueden ser de agua dulce, salada o una mezcla de ambas (Postel, 2006). Los ríos, lagos, lagunas, arroyos, pantanos, ciénegas, cenotes, aguas subterráneas conforman las aguas continentales naturales; además están aquellas creadas por el hombre en forma de presas o lagos artificiales. Las aguas continentales ocupan tan solo el 1% de la superficie terrestre, pero albergan el 40% de la diversidad de peces del planeta (Zambrano, 2007). De la superficie continental ocupada por los depósitos de agua en el territorio nacional, el 44% corresponde a agua dulce y el 56% a agua salobre (Torres-Orozco y Pérez-Hernández, 2011). La ictiofauna presente en estos cuerpos de agua representa al 60% de las especies de Norteamérica y al 6% del total mundial (Zambrano, 2007).

El grupo más diverso que habita las aguas interiores es el de los peces. Hoy en día, se han descrito más de 384 especies de peces dulceacuícolas en México, ubicándolo solo por debajo de Estados Unidos, que ha descrito 800 especies de peces, seguido de Japón con 186, Canadá con 177 y Turquía con 152 especies (Torres-Orozco y Pérez-Hernández, 2011). Una característica interesante de la biodiversidad de aguas continentales es que presenta un alto grado de endemismo, lo que significa que existe una gran variedad de especies que presentan una distribución altamente restringida (Zambrano, 2007). Más del 50% de las especies que habitan en las cuencas hidrológicas de México son endémicas en menor o mayor escala (Sánchez, 2007).

Además de albergar una amplia diversidad de peces, microorganismos, invertebrados, algas, vegetación riparia, anfibios, reptiles, peces y en algunos casos mamíferos, las aguas continentales y su conservación son importantes por diversas razones (Postel, 2006). Por un lado, nutren el suelo y favorecen el desarrollo de especies vegetales que nutren y protegen fauna. También actúan como zonas de conectividad entre los sistemas acuáticos y marinos, favorecen el intercambio de nutrientes y a su vez el establecimiento de zonas como los estuarios que a su vez poseen una gran diversidad biológica (Bucher et al. 1997). Por otro lado, se encuentra el hecho evidente de abastecer agua potable para consumo humano (Postel, 2006).

En los ecosistemas continentales de México, la escasez de agua y la intensificación de las sequías se han vuelto

factores determinantes de la degradación ambiental. Más allá de otras presiones antropogénicas, la disminución del volumen, permanencia y conectividad del agua reconfigura la estructura y función de los cuerpos de agua, afectando de forma directa la disponibilidad de hábitat, los ciclos de reproducción, alimentación y la supervivencia de especies con distribución restringida (Postel, 2006; Sánchez, 2007; Zambrano, 2007).

Por supuesto la actividad humana tiene consecuencias sobre ecosistemas acuáticos continentales. Si bien todo ecosistema posee cierta capacidad de resiliencia para permanecer estable, existe una capacidad máxima de tolerancia. Pasado este umbral, se llega a un punto donde el daño llega a ser irreversible, generando una disminución del recurso (Andrade-Gómez y Castro-López, 2012).

PÉRDIDA DE LA BIODIVERSIDAD

En México y en el mundo, la pérdida de la biodiversidad ha aumentado significativamente en las últimas décadas (Andrade-Gómez y Castro-López, 2012). El creciente consumo de bienes y servicios en los países desarrollados ha provocado que se intensifique la explotación de recursos naturales de países en vías de desarrollo para satisfacer la demanda internacional. Esta creciente presión ha provocado la sobreexplotación y degradación de los ecosistemas, acelerando la pérdida de la biodiversidad debido a que la expansión productiva frecuentemente deriva en la destrucción de hábitats y la afectación a especies nativas. (Postel, 2006). Desgraciadamente, la conservación de la biodiversidad frecuentemente no es una prioridad en los países subdesarrollados (Andrade-Gómez y Castro-López, 2012). La principal causa de la pérdida de la biodiversidad es la pérdida de hábitat. Hoy en día, solo en México se ha perdido el 50% de los ecosistemas naturales y por consiguiente se ha visto amenazada la biodiversidad que habitaba en estos ecosistemas (Sánchez, 2007). La pérdida de hábitat está directamente relacionada con el aumento de sustancias contaminantes en los ambientes acuáticos, la sobreexplotación del recurso y de las especies acuáticas, la introducción de especies invasoras que depredan y compiten con las especies nativas y el aumento de las temperaturas producto del cambio climático (Zambrano, 2007).

Los ecosistemas acuáticos son particularmente vulnerables a la pérdida de hábitat por sobreexplotación de los recursos, por lo que los principales factores de riesgo para la biodiversidad son antropogénicos y estos han ocasionado la extinción de especies, algunas de las cuales probablemente ni siquiera se llegaron a conocer (Torres-Orozco y Pérez-Hernández, 2011).

DEGRADACIÓN DEL HÁBITAT DULCEACUÍCOLA: UN ATENTADO CONTRA LA DIVERSIDAD ICTIOLÓGICA

El aprovechamiento inadecuado de cuerpos de agua, la sequía, la reducción de hábitats por cambios de uso de suelo, entre otros factores, han ocasionado que el número de especies de peces dulceacuícolas consideradas en riesgo de extinción aumente con rapidez. En 1963, en México se reconocían 11 especies de peces en peligro de extinción y siete extintas. Luego de 40 años, este número ascendió a 83 en peligro y 25 extintas (Contreras-Balderas et al. 2003). Nuestro país se encuentra actualmente catalogado en los primeros lugares del mundo con una mayor cantidad de especies de peces dulceacuícolas en peligro de extinción (Valdés-González et al. 2018). Las actividades antropogénicas han contribuido a aumentar estas cifras, pero existen otros factores que repercuten en la supervivencia de las especies dulceacuícolas, tales como la cantidad de individuos que conforman sus poblaciones, sus relaciones ecológicas con otras especies y su distribución geográfica restringida.

De las casi 400 especies de peces dulceacuícolas de México, 208 de ellas habitan áreas menores a 1,000 km² ya sea de forma natural o como consecuencia de actividades humanas (Torres-Orozco y Pérez-Hernández, 2011). El 50% de estas especies son endémicas y 104 de ellas se encuentran actualmente en peligro de extinción (Torres-Orozco y Pérez-Hernández, 2011). Esta alta proporción de especies endémicas está estrechamente ligada a la historia evolutiva y biogeográfica de la ictiofauna mexicana. La mayoría de los peces de aguas continentales de México

tuvieron su origen en los océanos Indo-Pacífico y Atlántico Oriental. Su radiación y evolución en aguas continentales y estuarinas están íntimamente relacionadas con la historia geológica del país (Zambrano, 2007). La fragmentación de hábitats acuáticos llevó al aislamiento genético de las poblaciones y probablemente a una especiación local. El gran número de especies autóctonas entre los peces mexicanos sugiere una evolución local importante. El problema relacionado con que una especie habite en un sitio restringido es que, si ese sitio se pierde, lo más probable es que la especie desaparezca también (Valdés-González et al. 2018). Por ejemplo, existen especies que habitan únicamente en las pozas de Cuatro Ciénegas, en Coahuila; si éstas desaparecieran, también lo harán las especies que lo habitan (Aguilera-González, 1998).

CASOS DE EXTINCIÓN: LOS CACHORRITOS DE NUEVO LEÓN AL BORDE DE LA DESAPARICIÓN

Los cachorritos— *Pupfish*, en inglés—son un grupo de peces de la familia Cyprinodontidae. Estos peces son conocidos por la peculiaridad de sobrevivir en condiciones hostiles, por lo que su alta tolerancia a condiciones extremas los convierte en indicadores de alteraciones en los ecosistemas (Valdés-González et al. 2018). Particularmente el género *Cyprinodon* presenta un alto grado de endemismos y distribución restringida que los vuelve más vulnerables a los factores de pérdida de la biodiversidad (Tabla 1) (Aguilera-González, 1998).

Uno de los casos más cercanos de extinción sucedió en el suroeste del estado de Nuevo León a consecuencia de la desecación de cinco manantiales por la explotación creciente de los mantos freáticos utilizados para fines agrícolas (Aguilera-González, 1998). Entre las especies extintas se pueden citar *Cyprinodon inmemoriam*, descubierta en 1984 y extinta en 1986, y *Cyprinodon ceciliae*, descubierta en 1988 y extinta en 1990 (Valdés-González et al. 2018). Estas especies pudieron ser identificadas previo a la muerte de los últimos organismos de su especie; sin embargo, debido a la pérdida de su hábitat, las especies se perdieron para siempre (Aguilera-González, 1998).

Tabla 1. Especies del género *Cyprinodon* extintas en la naturaleza en Nuevo León, México.

Especie	Nombre común	Hábitat	Año de descripción	Año de extinción en la naturaleza
Cyprinodon inmemoriam	Cachorrito de la Trinidad	Manantial La Trinidad, Aramberri	1984	1986
Cyprinodon ceciliae	Cachorrito Cecilia	La Presa, Aramberri	1988	1990
Cyprinodon alvarezii	Cachorrito del Potosí	Manantial El Potosí, Galeana	1948 -1961	1996
Megupsilon aporus	Cachorrito enano	Manantial El Potosí, Galeana	1948 -1961	1996
Cyprinodon veronicae	Cachorrito del Charco Azul	Manantial Charco Azul, Aramberri	1993	1996
Cyprinodon longidorsalis	Cachorrito de La Palma	Charco La Palma, Aramberri	1984	1994

El manantial 'El Potosí', en el ejido Catarino Rodríguez en el municipio de Galeana, Nuevo León, se encontraba al pie del Cerro del Potosí. Formaba un estanque transparente que medía aproximadamente una hectárea y que contaba con abundante vegetación acuática (Aguilera-González, 1998). Actualmente el manantial se encuentra seco. La causa de la desaparición de este manantial fue la explotación del acuífero con fines de riego agrícola (Valdés-González et al. 2018). En él habitaban las especies *Cyprinodon alvarezi*, conocido como "cachorrito del Potosí", y *Megupsilon aporus*, mejor conocido como "cachorrito enano". Ambas especies de la familia Cyprinodontidae y endémicas de dicho manantial, fueron descritas entre 1948 y 1961 y reportadas como extintas para 1996 (Valdés-González et al. 2018).

El "Manantial Charco Azul" o "El Barreno" se encontraba en el lago pluvial "Bolsón de Sandia", a una altura aproximada de 1,600 metros sobre el nivel del mar (Aguilera-González, 1998). Consistía en una serie de charcos que recibían agua de varios manantiales. La localidad se descubrió en 1984 y tenía una profundidad de 3 metros. Para abril de 1985 la profundidad descendió casi el 50%, llegando a medir 1.60 metros de profundidad. El manantial aumentaba o disminuía de acuerdo con los ciclos de cosecha de los sitios aledaños, lo que provocó que para 1991 se hubiera perdido el 90% de su área (Valdés-González et al. 2018). En 2010, el área quedó completamente seca e incluso ya se utilizaba directamente el área como zona de cultivo. En este manantial habitaba el "cachorrito del charco azul" *Cyprinodon veronicae*, categorizado como en peligro de extinción, ya que aún no ha sido actualizado el estatus en la Norma Oficial Mexicana 059 para la conservación de especies en riesgo de extinción. Algunos ejemplares se conservan en cautiverio, pero hasta el momento no se tiene reporte de que la especie exista en su hábitat natural (Aguilera-González, 1998).

Finalmente, vale la pena revisar el ejemplo del manantial "Charco La Palma", el cual también se encontraba dentro del Bolsón de Sandia. El área en el que este manantial se encontraba es muy árida con poca vegetación de acacias y algunas suculentas (Aguilera-González, 1998). El área que ocupaba el cuerpo de agua era muy pequeña, con una superficie de aproximadamente 6 metros de diámetro, tamaño que fue reduciéndose por la extracción de agua y finalmente secó en 1995. Los habitantes del lugar decidieron limpiarlo con la finalidad de revivir el charco, pero esto no fue posible. En el Charco La Palma habitaba el pez *Cyprinodon longidorsalis* o mejor conocido como "cachorrito la palma". Esta especie fue descubierta en 1984 y declarada extinta solo 10 años después de su descripción (Valdés-González et al. 2018).

La Dra. Lourdes Lozano Vilano y el Dr. Salvador Contreras, catedráticos de la Facultad de Ciencias Biológicas de la UANL y grandes referentes en la ictiología mexicana, llevaron a cabo la descripción de estos peces conocidos como cachorritos junto con sus hábitats y fueron testigos de cómo la degradación ambiental es capaz de avanzar con tal rapidez que llevó a la extinción de los organismos en un abrir y cerrar de ojos (Aguilera-González, 1998).

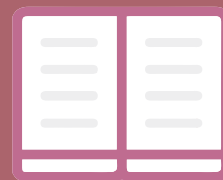
CONSIDERACIONES FINALES

Nuevo León atraviesa en este momento la peor crisis por falta de agua de las últimas décadas; la falta de lluvia y el constante crecimiento de la población en la zona metropolitana solo auguran que la escasez empeore en el futuro cercano. Afortunadamente, existen acciones que pueden llevarse a cabo para mitigar los daños que como humanidad hemos infligido a los cuerpos de agua. Un paso importante es la planificación y supervisión a largo plazo del uso de los recursos naturales, tanto del agua como de la biodiversidad que en ella habita, por medio de un enfoque integral que permita hacer un uso sustentable de estos servicios ecosistémicos. Es de vital importancia que se tomen acciones preventivas en lugares que no han sido explotados con fines de aprovechamiento. Asimismo, deben tomarse medidas para asegurar que los sitios donde se extrae agua no sobrepasen la capacidad de los ecosistemas acuáticos y evitar así alcanzar el punto de no retorno.

En definitiva, deben tomarse acciones para la conservación directa de los sitios y la biodiversidad. Es importante la creación de programas para la conservación ya sea directamente en el sitio o, en el caso de la biodiversidad, por medio de las Unidades de Manejo Ambiental para la Conservación de la Naturaleza (UMAs). Por medio de ellas se pueden crear programas para la protección y cuidado de especies en peligro de extinción o para el aprovechamiento sustentable de los recursos. Gracias a estas unidades ha sido posible conservar algunas especies de peces endémicos (Hernández-Silva et al. 2018).

Cada organismo en la tierra tiene una función ecosistémica y la desaparición de cualquiera de estos elementos contribuye al desequilibrio ecológico. La concientización ambiental sobre la explotación de los recursos acuáticos es muy importante. La educación temprana de las comunidades es prioritaria para hacer respetar las normas existentes y que los usuarios del agua tomen conciencia de que el uso de esta debe hacerse de una manera responsable y sostenible para garantizar la supervivencia de las aguas continentales, la biodiversidad que las habita y de nosotros mismos.

Literatura citada

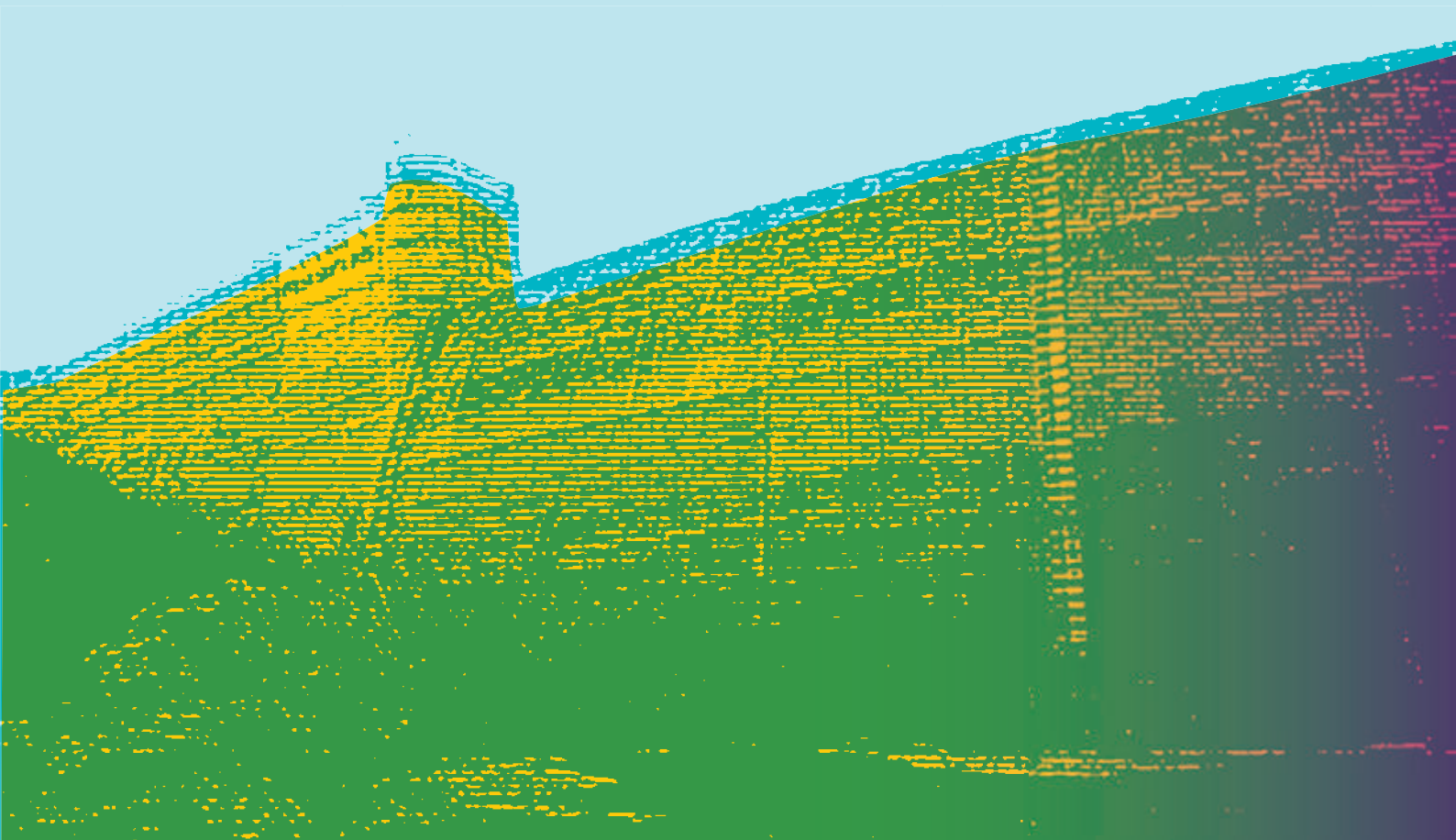


- Aguilera-González, C.J. 1998. Conservación en cautiverio de peces amenazados del noreste de México. Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Ciencias Biológicas. Informe final SNIB-CONABIO, Proyecto No. G005, México, D.F.
- Andrade-Gómez, G.I. y Castro-López, L.G. 2012. Degradación, pérdida y transformación de la biodiversidad continental en Colombia: invitación a una interpretación socio-ecológica. *Ambiente y Desarrollo*. 16 (30): 53-71.
- Bucher, E., Castro, G y Floris, V. 1997. Conservación de ecosistemas de agua dulce: hacia una estrategia de manejo integrado de recursos hídricos. Banco Interamericano de Desarrollo, Washington, D.C. (Serie Medio Ambiente y Desarrollo, No. ENV-114).
- Contreras-Balderas, S., Almada-Villela, P., Lozano-Vilano, M.L y García-Ramírez, M.E. 2002. Freshwater fish at risk or extinct in México: a checklist and review. *Reviews in Fish Biology and Fisheries*. 12 (2): 241-251. <https://doi.org/10.1023/A:1025053001155>
- Hernández-Silva, D., Pulido-Silva, M., Zuria, I., Gallina-Tessaro, S y Sánchez-Rojas, G. 2018. El manejo como herramienta para la conservación y aprovechamiento de la fauna silvestre: acceso a la sustentabilidad en México. *Acta Universitaria*. 28 (4): 31-41. <https://doi.org/10.15174/au.2018.2171>
- Postel, S. 2006. Conservando los ecosistemas de agua dulce. Pp. 101-134. En: Worldwatch Institute (Ed.). *La situación del mundo 2006: informe anual del Worldwatch Institute sobre progreso hacia una sociedad sostenible*. Icaria, Barcelona, España.
- Sánchez, Ó. 2007. Ecosistemas acuáticos: diversidad, procesos, problemática y conservación. Pp. 11-36. En: Sánchez, Ó., Herzig, M., Peters, E., Márquez, R y Zambrano, L (Eds.). *Perspectivas sobre conservación de ecosistemas acuáticos en México*. Instituto Nacional de Ecología (INE-SEMARNAT), Ciudad de México, México.
- Torres-Orozco, R.E. y Pérez-Hernández, M.A. 2011. Los peces de México: una riqueza amenazada. *Revista Digital Universitaria*. 12 (1): 1-15.
- Valdés-González, A., Martínez-Estévez, L., Ángeles-Villeda, M.E. y Ceballos, G. 2020. The extinction of the Catarina pupfish *Megupsilon aporus* and the implications for the conservation of freshwater fish in Mexico. *Oryx*. 54 (2): 154-160. <https://doi.org/10.1017/S003060531800056X>
- Zambrano, L. 2007. La vida en las aguas continentales. *Ciencia (Revista de la Academia Mexicana de Ciencias)*. 58 (3): 72-79.

SISTEMAS LACUSTRES BAJO LA LUPA:

ANÁLISIS DE CALIDAD DE AGUA EN LA RESERVA DE LA BIOSFERA SIERRA LA LAGUNA Y OASIS ALEDAÑOS

/// JUAN RAMÓN BELTRÁN-CASTRO^{1,2}, LAURA MACARIO-GONZÁLEZ^{2*},
PLUTARCO HERNÁNDEZ-HERNÁNDEZ³, & SERGIO COHUO³



¹Centro de Bachillerato Tecnológico Industrial y de Servicios No. 62, Jalisco S/N, Las Garzas, Baja California Sur, México. C.P. 23070.

²Tecnológico Nacional de México / IT de la Zona Maya, Carretera Chetumal-Escárcega km 21.5, Ejido Juan Sarabia, Quintana Roo, México. C.P. 77965.

³Tecnológico Nacional de México / IT Chetumal, Av. Insurgentes 330, Quintana Roo, México. C.P. 77013.

*Autor para correspondencia: laura.mg@zonamaya.tecnm.mx



RESUMEN

La Reserva de la Biosfera Sierra la Laguna (RBSL) en Baja California Sur, es una zona de almacenamiento natural de agua, que recarga los mantos acuíferos que abastecen a las ciudades de la Paz y Los Cabos. Sin embargo, en los últimos años los acuíferos en esta región han sido objeto de sobreexplotación y depósito de desechos, que ha conducido a un incremento de nutrientes y contaminantes provenientes principalmente de actividades ganaderas e industriales. No obstante, se desconoce el estado actual de salud de los ambientes acuáticos en la RBSL. En este trabajo, se evaluó la calidad de agua de once y dieciocho sistemas lacustres durante las temporadas **cálido/seco y frío/húmedo** del año 2023 respectivamente, de la Región Hidrológica Prioritaria, Reserva de la Biosfera Sierra La laguna y oasis aledaños. La finalidad de este trabajo fue determinar la calidad del agua en estos ecosistemas acuáticos y obtener datos que sirvan como base para futuros programas de monitoreo y conservación del recurso agua.

ABSTRACT

The Sierra La Laguna Biosphere Reserve (SLBR) in Baja California Sur serves as a natural water reservoir, replenishing the aquifers that supply the cities of La Paz and Los Cabos. In recent years, however, these aquifers have faced overexploitation and waste disposal, leading to increased levels of nutrients and contaminants, mainly from livestock and industrial activities. Currently, the health status of aquatic environments within the RBSL remains unknown. In this study, water quality was assessed in eleven and eighteen systems during the warm/dry and cool/wet seasons of 2023, respectively, within the Priority Hydrological Region of the Sierra La Laguna Biosphere Reserve and surrounding oases. The goal was to determine the water quality of these aquatic ecosystems and generate baseline data to support future monitoring and water resource conservation programs.



Palabras Clave: Índice de Calidad del Agua, Baja California Sur, Sierra la Laguna, cuenca hidrológica, sistemas acuáticos epicontinentales

Key words: Water Quality Index, contaminants, aquifers, hydrological basin, aquatic systems

INTRODUCCIÓN

El sur de la península de Baja California es una región predominantemente árida, pero en ella destaca un entorno muy particular y altamente diverso: la Sierra La Laguna. Tiene una extensión de 48 km y elevaciones de hasta 2000 metros, por lo que dados los gradientes de elevación, existen microclimas y ecosistemas únicos (Sánchez-Brito et al., 2013). La Sierra la Laguna es una zona clave para la captación de agua dulce en una de las regiones con mayor aridez en México, Baja California Sur. Es además una zona de alta biodiversidad porque constituye el sitio de distribución de al menos 85 especies de plantas superiores exclusivas de la región (Avilés-Polanco et al., 2021; CONANP, 2003) y centro de endemismo para aves.

La importancia ambiental de la Sierra La Laguna fue oficialmente reconocida en 1994, cuando se le otorgó el estatus de Reserva de la Biosfera y posteriormente se declaró zona hidrológica prioritaria a la reserva y cuerpos de agua cercanos, reconocidos como oasis aledaños. Por lo cual, actividades como la minería e industria se redujeron considerablemente, no obstante, su integridad se ve amenazada por el desarrollo turístico, la ganadería y la minería, junto con fenómenos naturales y el cambio climático, que impactan directamente el equilibrio del ecosistema y la disponibilidad de agua (Brauman et al., 2007; Fasio & Ibáñez, 2011; Solís-Cámara et al., 2014; Bhateria & Jain, 2016; Salgado-Beltrán et al., 2020; Ortega-Arriaga et al., 2023).

Actualmente las ciudades de La Paz y Los Cabos, que en conjunto superan 500,000 habitantes (INEGI, 2020), utilizan los recursos hídricos de la Reserva de la Biosfera Sierra la Laguna (RBSL). Durante los últimos años, sin embargo, se ha observado una sobreexplotación de los acuíferos, y un déficit del recurso hídrico en la región (Carrillo-Guerrero, 2010; Boyd, 2019). A pesar de esta situación crítica, no se han establecido políticas eficientes para la gestión, conservación o monitoreo de la calidad del agua.

Una manera de estimar la salud ambiental del recurso hídrico en la RBSL es a través del estudio de la calidad de agua de los ambientes acuáticos superficiales y subterráneos. En la RBSL, los ambientes superficiales son en su mayoría temporales, principalmente arroyos y pozas. También existen fuentes permanentes a distintas altitudes y cerca de la costa, las cuales forman parte del flujo natural del agua de zonas altas al mar.

Hasta el momento, han sido pocos los esfuerzos por establecer un monitoreo continuo y permanente, que permita evaluar los cambios producidos por el ambiente

y el hombre en el recurso hídrico. Se ha asumido que los cuerpos de agua dentro de la RBSL son ambientes sanos y poco impactados, por estar menos expuestos a la presión humana directa (Gleick, 2000). Sin embargo, las actividades ganaderas podrían estar introduciendo bacterias coliformes (fecales y no fecales) al agua, que son contaminantes y podrían causar enfermedades (Lagunas-Vázquez et al., 2013; Salgado-Beltrán et al., 2020). Los ambientes cercanos a las ciudades son más susceptibles a contaminación, por el aporte de nutrientes como el nitrógeno y fósforo, provenientes de la agricultura, ganadería e industria y que promueven el cambio trófico (cantidad de nutrientes) y crecimiento de plantas invasoras como el jacinto de agua (Lagunas-Vázquez et al., 2013; Saalidong et al., 2022; Salgado-Beltrán et al., 2020).

El objetivo de este estudio fue determinar el estado de salud ambiental de los cuerpos de agua en la Reserva de la Biosfera Sierra La Laguna y sus alrededores, a través del análisis de la calidad del agua. Se midieron parámetros físicos-químicos (temperatura, pH, oxígeno disuelto, turbidez, conductividad, sólidos disueltos, nitrógeno y fósforo) y biológicos (demanda bioquímica de oxígeno y presencia de coliformes totales) del agua, aplicar el índice de calidad del agua (ICA) y determinar cuantitativamente el estado de salud de cada sistema. Se compararon las condiciones entre estaciones seca y lluviosa, con el propósito de evaluar cómo influye la precipitación en la calidad del agua.

MATERIALES Y MÉTODOS

ÁREA DE ESTUDIO

La Reserva de la Biosfera Sierra La Laguna (RBSL) se ubica en el sur del estado de Baja California Sur y abarca más de 112 mil hectáreas (Figura 1). Fue declarada Área Natural Protegida en 1994 (CONANP, 2003) y, un año después, reconocida internacionalmente por la UNESCO dentro del Programa “El Hombre y la Biosfera” (Romero-Schmidt y Ortega-Rubio, 2012). Además, algunos cuerpos de agua dentro de esta región y sus alrededores —como el estero de San José del Cabo— han sido designados como sitios RAMSAR, por su importancia como humedales.

La Sierra La Laguna es considerada una “isla biológica” por su aislamiento geográfico y alto grado de endemismo. Algunas especies únicas de esta región son el pino piñonero (*Pinus lagunae*), el encino de la Sierra (*Quercus devia*) y el madroño de la Sierra (*Arbutus peninsularis*), así como animales únicos como la lagartija de Lick (*Sceloporus licki*), el camaleón cornudo de La Laguna (*Phrynosoma coronatum blainvillii*) y el ratón de Eva (*Peromyscus eva*) (Ojeda-Ruiz & Lacruhy, 2024;

Sánchez-Brito et al., 2013). Su singular biodiversidad está relacionada con procesos geológicos de aislamiento continental, que generaron distintos gradientes climáticos y ecosistemas, desde matorrales xerófilos (arbustos y plantas con espinas y hojas pequeñas) hasta bosques de coníferas (pinos y encinos) (CONANP, 2003).

MUESTREO Y ANÁLISIS DEL AGUA

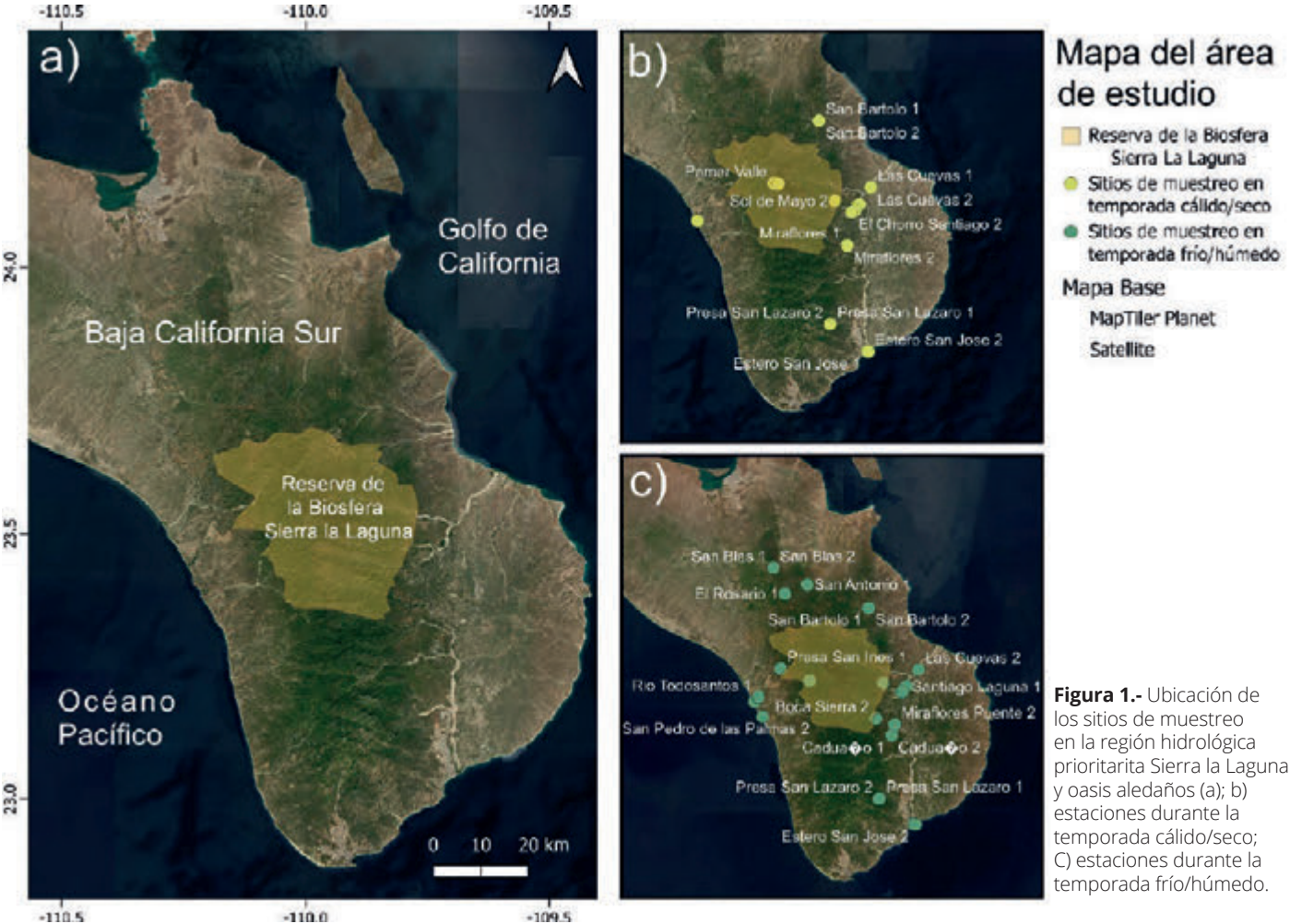
Se recolectaron muestras de agua en la Sierra La Laguna y en oasis cercanos durante dos periodos del año 2023: julio (temporada cálido y seco) y diciembre (temporada frío y húmedo). En total se muestrearon 11 cuerpos de agua en julio (20 puntos de muestreo) y 18 cuerpos de agua en diciembre (36 puntos), ya que durante el periodo de lluvias emergen nuevos cuerpos de agua temporales que no están disponibles en época seca (Figura 1).

En cada sitio se midieron parámetros físicos y químicos del agua en la superficie (entre 0 y 0.5 metros de profundidad), como temperatura, pH, oxígeno disuelto, turbidez, conductividad y sólidos disueltos, mediante instrumentos portátiles multiparamétricos. También se evaluaron la presencia de nutrientes como nitratos y fosfatos. Se

analizaron parámetros biológicos como la demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅) y la presencia de bacterias coliformes, usando técnicas de espectrofotometría y cultivo microbiológico, respectivamente. Los valores obtenidos se compararon con los límites permisibles establecidos en Criterios Ecológicos de Calidad del Agua CE-CCA-001/89 (SEDUE,1989).

Tabla 1.- Variables ambientales medidas para el cálculo del ICA con sus respectivos pesos ponderados

Parámetro	Peso ponderado
Oxígeno disuelto	0.17
Coliformes totales	0.16
pH	0.11
DBO ₅	0.11
Temperatura	0.1
Nitratos	0.1
Fosfatos	0.1
Turbidez	0.08
Sólidos totales	0.07



Para evaluar el estado de salud del agua, se utilizó el Índice de Calidad del Agua (ICA), siguiendo el método propuesto por Brown et al., (1970) y adaptado por la Fundación Nacional de Ciencias (NSF) de Estados Unidos (Grey et al., 2020; Aljanabi et al., 2021; Padilla Calderón, 2024). El cálculo del índice se realizó usando la plataforma "Know Your Water" (disponible en knowyourh2o.com).

Se aplicó una prueba estadística de Monte Carlo para identificar qué variables influían más en la calidad del agua de los distintos cuerpos, utilizando el software *PC-ORD v6*. Los parámetros ambientales medidos de los cuerpos de agua se usaron para aplicar la fórmula de ICA. Se usó una escala según el grado de calidad del agua donde A significa excelente; B, bueno; C, medio; D, malo; y E, pésimo (Tabla 2).

Tabla 2.- Grado de calidad del agua según el intervalo del índice

Grado	Intervalo de ICA	Estado de calidad
A	90-100	Excelente
B	70-89	Bueno
C	50-69	Medio
D	25-49	Malo
E	0-24	Pésimo

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

VARIACIÓN ESTACIONAL Y CALIDAD DEL AGUA

Durante el verano de 2023, en la temporada más cálida y seca, muchos cuerpos de agua en la región de la Sierra La Laguna se encontraban secos o con bajo caudal, lo que limitó el número de sitios disponibles para muestreo. Aun así, se logró evaluar la calidad del agua en 11 cuerpos, tanto dentro como fuera del área protegida. En contraste, durante la temporada fría y húmeda (invierno), gracias a las lluvias, se pudo acceder

a 18 cuerpos de agua en funcionamiento, incluidos manantiales, arroyos y oasis (Figura 2).

TEMPERATURA Y OXÍGENO DISUELTO

En verano las temperaturas del agua fueron más cálidas. San Lázaro registró el valor máximo, con 35.8 °C, mientras que el sitio más fresco fue Primer Valle con 20.2 °C. En invierno, los valores oscilaron entre 17.8 °C (Santiago Laguna) y 29 °C (Estero San José). En cuanto al oxígeno disuelto, parámetro clave para la vida acuática, en verano se registraron valores preocupantemente bajos en algunos sitios, como Todos Santos (0.94 mg/l), lo que puede indicar condiciones poco saludables para organismos acuáticos. En contraste, en invierno, se observaron valores más altos, destacando la laguna Todos Santos con 16.2 mg/l, probablemente debido a una mayor circulación y recarga de agua tras las lluvias.

CONTAMINACIÓN BIOLÓGICA: COLIFORMES TOTALES

Los coliformes totales, indicadores de contaminación por materia orgánica, se encontraron en concentraciones elevadas en sitios cercanos a zonas urbanas o agrícolas. Por ejemplo, en verano, Todos Santos registró 912 unidades formadoras de colonias (UFC)/100 ml, y en invierno, Estero San José alcanzó 960 UFC/100 ml. En contraste, lugares como San Bartolo mostraron niveles muy bajos, incluso con bacterias ausentes en invierno, lo que sugiere menor presencia humana o mejor estado de salud ambiental.

NUTRIENTES Y EUTROFIZACIÓN

Los niveles de fosfatos y nitratos, nutrientes clave para la productividad primaria y secundaria, que en exceso pueden generar eutrofización (crecimiento excesivo de algas), también mostraron patrones interesantes. En verano, el Estero San José presentó niveles de fosfatos de 10 mg/l, y en invierno, San Antonio llegó hasta 14 mg/l. En ese mismo sitio, los

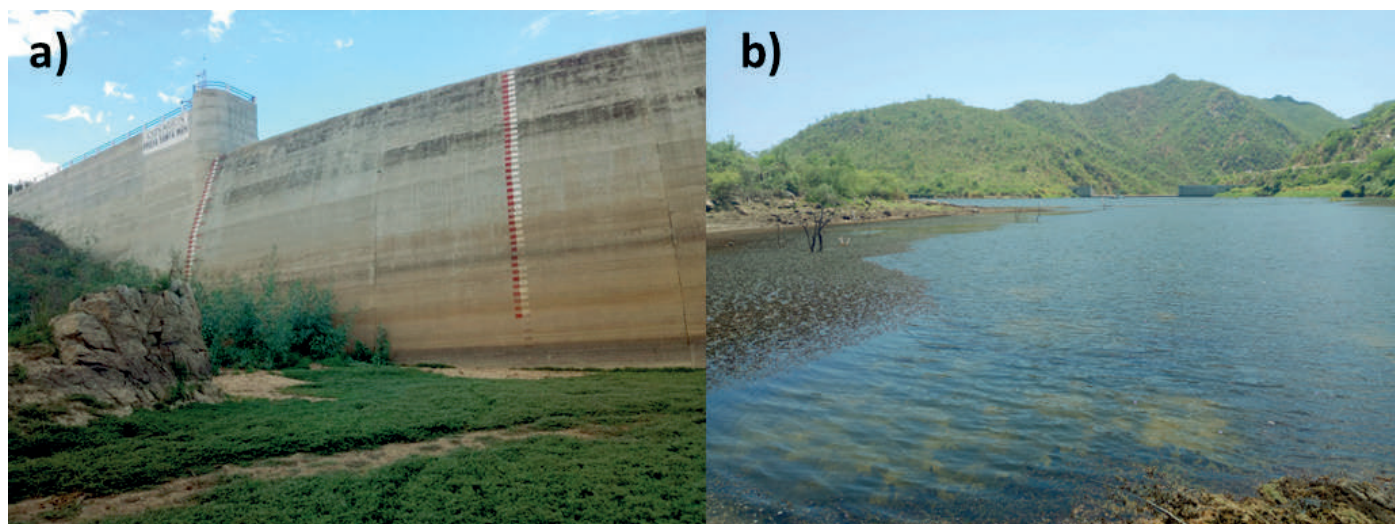


Figura 2.- Presa Santa Inés. Comparación entre temporadas cálido/seco (a) – frío/húmedo (b)

nitratos alcanzaron 20 mg/l, lo que representa un riesgo para la calidad del agua si se mantiene a largo plazo. Estos niveles altos suelen estar relacionados con descargas de aguas residuales y escorrentía agrícola, como es el caso de la Laguna de Todos Santos, que recibe agua de arroyos que atraviesan campos de cultivo, posiblemente cargados con fertilizantes y pesticidas (Fichera, 2019).

TURBIDEZ, SÓLIDOS DISUELTOS Y pH

La turbidez, o cantidad de partículas suspendidas en el agua, fue mucho mayor en invierno. Por ejemplo, el Rosario presentó 71.03 unidades nefelométricas (NTU), un valor muy por encima de lo recomendable para agua superficial. En contraste, sitios como Todos Santos Río en invierno, o San Bartolo en verano, presentaron valores muy bajos (menos de 0.1NTU), lo que indica aguas más limpias y claras. La concentración de sólidos disueltos (como sales y minerales) también varió entre sitios. En verano, el máximo fue en Todos Santos (1.31 ppt), mientras que en invierno San Antonio presentó 0.87 ppt. Estos valores pueden estar relacionados tanto con la evaporación como con la infiltración de contaminantes urbanos o agrícolas. El pH varió desde valores ligeramente ácidos (6.99) hasta bastante alcalinos (9.31), con San Lázaro destacando en ambas temporadas como uno de los sitios más alcalinos. Si bien estos valores aún están dentro de rangos naturales, pueden influir en la solubilidad de nutrientes y metales en el agua.

DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXÍGENO (DBO₅)

La DBO₅, que indica la cantidad de oxígeno que necesita el agua para descomponer materia orgánica, fue especialmente alta en invierno en San Lázaro (23.7 mg/l), lo cual sugiere una alta carga orgánica posiblemente relacionada con descargas de aguas residuales o material vegetal en descomposición. En cambio, Segundo Valle

presentó uno de los valores más bajos en ambas temporadas.

ÍNDICE DE CALIDAD DEL AGUA (ICA)

Según el Índice de Calidad del Agua (ICA), en la temporada cálida/seca de julio, el 64 % de los sitios presentó mala calidad (valores entre 25 y 50), y el resto calidad media (entre 50 y 70) (Figura 2). Los sitios con peor calidad fueron el Estero de San José (ICA = 37) y Laguna de Todos Santos (ICA = 44), mientras que San Bartolo y Segundo Valle mostraron mejores condiciones (ICA > 54). Así mismo en el test de Monte Carlo se encontró que de las variables medidas, las más importantes para la buena calidad del agua fueron las que tenían una menor temperatura, más oxígeno disuelto, un pH neutro y una DBO₅ bajo; por otro lado, los sistemas que presentaron mala calidad fueron aquellos que tenían un recuento de coliformes totales alto (Tabla 3).

Tabla 3.- Valores obtenidos mediante el test de Monte Carlo de variables ambientales en la Reserva de la Biosfera Sierra La Laguna

Variable	Grupo	Valor-p
Temperatura	Buena	0.001
Oxígeno disuelto	Buena	0.001
Coliformes totales	Mala	0.006
Fosfatos	Mala	0.1542
Nitratos	Mala	0.0841
Sólidos disueltos	Mala	0.4605
Turbidez	Media	0.3834
pH	Buena	0.001
DBO	Buena	0.016

*Valores en negritas indican variables que obtuvieron valores-p significativos

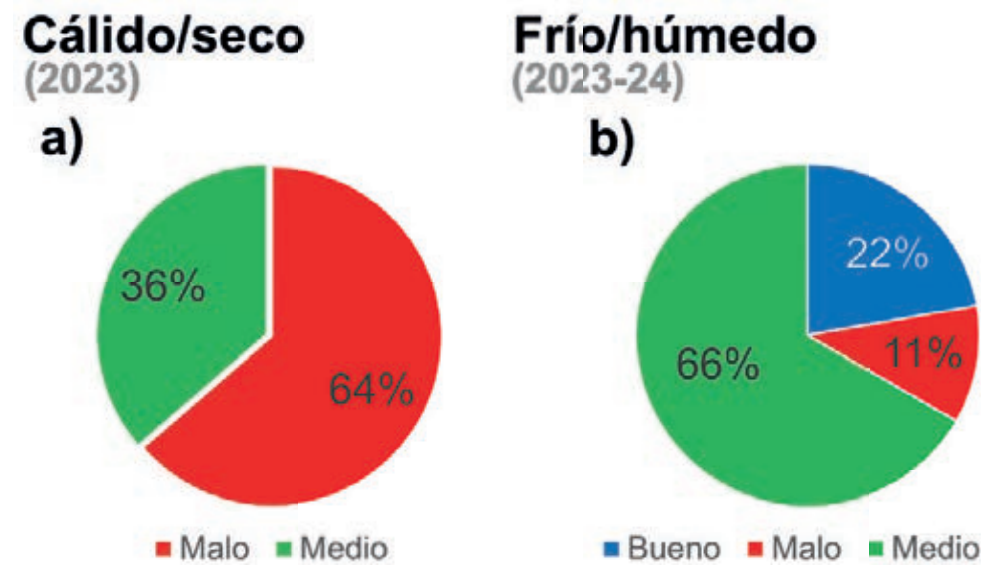


Figura 3.- Calidad de agua en los cuerpos lacustres en la Reserva de la Biosfera Sierra la Laguna por temporada, expresado en porcentaje. a) Valores para la temporada cálido/seco, b) Valores para la temporada frío/húmedo.

El caso del Estero San José ilustra bien los conflictos entre urbanización y conservación. En sus inmediaciones, existen asentamientos humanos sin drenaje adecuado, y desde 1985 el acuífero que lo abastece está sobreexplotado (Guzmán et al., 1994; Olmos-Martínez et al., 2016). Para mantener el caudal del estero, se descargan aguas tratadas desde la planta de tratamiento local, lo cual ayuda a preservar su vegetación, pero también introduce contaminantes que podrían superar los estándares sanitarios aceptables (Covarrubias et al., 2018; Shiba-Reyes, 2019; Wurl & Lamadrid, 2016).

CONCLUSIONES

Este estudio ofrece una visión integral de la calidad del agua en cuerpos superficiales de la Reserva de la Biosfera Sierra La Laguna y sus oasis cercanos, una región clave para el equilibrio ecológico y el suministro hídrico del sur de Baja California Sur.

Impacto Humano: Muchos cuerpos de agua, especialmente en la temporada seca, están en condiciones desfavorables y con aporte de contaminantes. Sitios cercanos a áreas urbanas o agrícolas, como el Estero de San José o la Laguna de Todos Santos, son los más afectados por la contaminación de bacterias, nutrientes y materia orgánica.

Valor de la Conservación: Lugares menos impactados como San Bartolo o Segundo Valle mantienen una mejor calidad del agua, lo que subraya la importancia de proteger estas zonas para asegurar el acceso a agua limpia para el desarrollo social y protección de la biodiversidad. Hasta el momento solo existe un sitio Ramsar en esta zona el Sistema ripario de la cuenca y Estero de San José del Cabo.

Influencia de las lluvias: La comparación estacional revela que, aunque las lluvias pueden mejorar la disponibilidad de agua y diluir contaminantes, también pueden arrastrar residuos orgánicos y químicos de zonas agrícolas o urbanas, aumentando la turbidez y la carga de nutrientes.

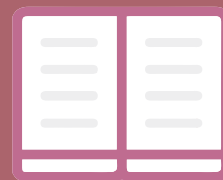
Falta de Monitoreo: A pesar de la protección de la Sierra La Laguna, aún no existe un sistema de monitoreo constante ni políticas efectivas para preservar la calidad del agua. Esta situación representa un grave riesgo para los ecosistemas y las comunidades que dependen de ellos.

Este trabajo proporciona una línea base para futuras investigaciones y es una herramienta para la toma de decisiones en temas de conservación, manejo sustentable del agua y educación ambiental. Es fundamental avanzar hacia un modelo de gestión hídrica que reconozca el valor ecológico, social y económico del agua, y que asegure su disponibilidad y calidad para las generaciones presentes y futuras.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos al CONAHCYT por el apoyo de la beca posdoctoral (CVU: 390374), a la CONANP-Reserva de la Biosfera Sierra la Laguna por el apoyo en las gestiones y facilidades prestadas; al parque ecológico Sol de Mayo por su cooperación para el acceso al área, al Tecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico de la Zona Maya e Instituto Tecnológico de Chetumal por el uso de infraestructura y equipo; al CBTIS 62 por proporcionar recursos de transporte y uso de instalaciones para el procesamiento de muestras. El proyecto 22582.25-P del Tecnológico Nacional de México aportó el financiamiento para esta investigación.

Literatura citada



- Aljanabi, Z. Z., Al-Obaidy, A.-H. M. J., & Hassan, F. M. (2021). A brief review of water quality indices and their applications. *IOP conference series: earth and environmental science*, 779(1), 012088.
- Avilés-Polanco, G., Almendarez-Hernández, M. A., Beltrán-Morales, L. F., Serrano-Fraire, I., & Ortega-Rubio, A. (2021). Consumer Preferences for Labeled Plant-Based Products Associated with Traditional Knowledge: A Study in Protected Natural Areas of Northwest Mexico. *Land*, 10(4), 412.
- Bhateria, R., & Jain, D. (2016). Water quality assessment of lake water: A review. *Sustainable Water Resources Management*, 2(2), 161-173. <https://doi.org/10.1007/s40899-015-0014-7>
- Boyd, C. E. (2019). *Water quality: An introduction*. Springer Nature.
- Brauman, K. A., Daily, G. C., Duarte, T. K., & Mooney, H. A. (2007). The Nature and Value of Ecosystem Services: An Overview Highlighting Hydrologic Services. *Annual Review of Environment and Resources*, 32(1), 67-98. <https://doi.org/10.1146/annurev.energy.32.031306.102758>
- Brown, R. M., McClelland, N. I., Deininger, R. A., & Tozer, R. G. (1970). A water quality index-do we dare. *Water and sewage works*, 117(10).
- Carillo-Guerrero, Y. (2010). Diagnóstico de la Cuenca de La Paz. Reporte Final del Convenio Niparaja-Pronatura Noroeste, México, 42.
- CONANP. (2003). Programa de Manejo Reserva de la Biosfera Sierra La Laguna, México (Primera edición). Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas-Semarnat. <https://www.gob.mx/conanp/acciones-y-programas/programas-de-manejo>
- Covarrubias, O. A., Martínez, L. F. A., & Martínez, E. O. (2018). El humedal prioritario de Baja California Sur, México: Servicios ecosistémicos. *Servicios ecosistémicos en humedales*, 151-179.
- Fasio, L., & Ibáñez, R. (2011). Problemática del mercado ecoturístico en la Reserva de la Biosfera Sierra La Laguna: El caso de San Dionisio, Baja California Sur. *Teoría y Praxis*, 10, 49-75.
- Fichera, M. M. (2019). Numerical Modeling and Hydrochemical Analysis of the Current and Future State of Seawater Intrusion in the Todos Santos Aquifer, Mexico [Master's Thesis, Colorado State University].
- Gleick, P. H. (2000). A Look at Twenty-first Century Water Resources Development. *Water International*, 25(1), 127-138. <https://doi.org/10.1080/02508060008686804>
- Grey, A. A., Canto, A., González, Y., Baria, K., & Castillo, I. (2020). Determinación de un índice de riesgo y vulnerabilidad en poblaciones costeras: Estudio de caso Portobelo, provincia de Colón. *Revista de I+ D Tecnológico*, 16(2), 1-8.
- Guzmán, J., Carmona, R., Palacios, E., & Bojórquez, M. (1994). Seasonal distribution of aquatic birds in Estero de San José del Cabo, BCS, Mexico. *Ciencias Marinas*, 20(1), 93-103.
- Lagunas-Vázquez, M., Acevedo-Beltrán, M., Cervantes-Martínez, E. F., & Felipe, L. (2013). Sociohistoria de la ganadería y su importancia en la seguridad alimentaria para las familias rancheras de la REBIOSLA. En Magdalena Lagunas-Vázquez Luis Felipe Beltrán-Morales Alfredo Ortega-Rubio y Magdalena Lagunas-Vázquez Luis Felipe Beltrán-Morales Alfredo Ortega-Rubio, Diagnóstico y análisis de los aspectos sociales y económicos en la reserva de la Biosfera Sierra La Laguna, La Paz, BCS (México): Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste.
- National Institute of Statistics and Geography (INEGI) 2020. Censo de Población y vivienda 2020. Available from <https://www.inegi.org.mx/programas/ccpv/2020/> [accessed 17 Feb 2025]
- Ojeda-Ruiz, M. Á., & Lacruhy, C. (2024). Integración de una empresa comunitaria de aviturismo en San Antonio de la Sierra, Reserva de la Biosfera Sierra la Laguna, Baja California Sur, México. En Juárez Macialla Judith, Plácido Roberto Cruz Chávez, Gustavo Rodolfo Cruz Chávez, Alberto Francisco Torres García, Estrategias para el Turismo Comunitario. Ediciones comunicación científica.
- Olmos-Martínez, E., Arizpe-Covarrubias, O., Contreras-Loera, M. R., González-Ávila, M. E., & Casas-Beltrán, D. A. (2016). Public opinion and perception on the conservation of estero san josé del cabo state ecological reserve and its area of influence. *Vivat Academia*, 19(135), 24.
- Ortega-Arriaga, P., López Morales, C. A., Caballero Güendulain, K., & Ortega-Rubio, A. (2023). Minería versus conservación de servicios ecosistémicos: El caso de Sierra La Laguna. *Economía, sociedad y territorio*, 23(72), 467-491.
- Padilla Calderón, T. A. (2024). Evaluación de la calidad de agua del río Sardinas de la parroquia Sardinas, ubicada en el cantón Chaco, provincia de Napo, mediante la identificación de macroinvertebrados bentónicos como bioindicadores. [Trabajo de integración curricular, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Ecuador].
- Romero-Schmidt, H., & Ortega-Rubio, A. (2012). Reserva de la Biosfera Sierra La Laguna. Salud ambiental versus minería a cielo abierto. *Ciencia y Desarrollo*, Versión para Internet.
- Saalidong, B. M., Aram, S. A., Otu, S., & Lartey, P. O. (2022). Examining the dynamics of the relationship between water pH and other water quality parameters in ground and surface water systems. *PloS one*, 17(1), e0262117.
- Salgado-Beltrán, V. A., Murillo-Amador, B., Nieto-Garibay, A., Aguilera, N., & Ortega-Pérez, R. (2020). Especies consumidas por cabras en la Sierra La Laguna, Baja California Sur. *Ecosistemas y recursos agropecuarios*, 7(3).
- Sánchez-Brito, I., Almendarez-Hernández, M. A., Morales-Zárate, M. V., & Salinas-Zavala, C. A. (2013). Valor de existencia del servicio ecosistémico hidrológico en la Reserva de la Biosfera Sierra La Laguna, Baja California Sur, México. *Frontera norte*, 25(50), 97-129.
- SEDUE (1989). Acuerdo por el que se establecen los Criterios Ecológicos de Calidad del Agua CE-CCA-001/89. Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología. Diario Oficial de la Federación, México, 13 de diciembre.
- Shiba-Reyes, M. Y. (2019). Efectos de ciclones tropicales sobre la cubierta vegetal de la cuenca baja y estero de San José del Cabo, BCS, México. [Master's Thesis, Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, SC].
- Solís-Cámara, A. B. S., Ramírez, J. S., Sierra, C. L. J., & Ortega-Rubio, A. (2014). Conservación en la Reserva de la Biosfera Sierra la Laguna, Baja California Sur: Logros y retos. *Investigación y ciencia*, 22(60), 78-84.
- Wurl, J., & Lamadrid, M. Á. I. (2016). Las Condiciones Hidrogeológicas en la Cuenca San José del Cabo, Baja California Sur, México. *Áreas Naturales Protegidas Scripta*, 2(2), 91-102.



DE LA MEDICINA AL AMBIENTE: LA PRESENCIA DE FÁRMACOS EN LOS ECOSISTEMAS ACUÁTICOS

FROM MEDICINE TO THE ENVIRONMENT:
THE PRESENCE OF PHARMACEUTICALS IN
THE AQUATIC ECOSYSTEMS

/ DRA. VERÓNICA RODRÍGUEZ SALDAÑA^a, ROBERTO A. ARREGUÍN-ESPINOSA DE
LOS MONTEROS^b, ESTEBAN LÓPEZ-SAMPEDRO^b Y DRA. LUZ O. LEAL QUEZADA^a

^aCentro de Investigación en Materiales Avanzados, S.C. Departamento de Medio Ambiente y Energía. Miguel de Cervantes 120, Chihuahua, Chih. 31136, México.

^bInstituto de Química. Departamento de Biomacromoléculas. Universidad Nacional Autónoma de México, Circuito Exterior s/n, Ciudad Universitaria, C.P. 04510, Ciudad de México, México.



Palabras clave: Fármacos; Contaminación; Cuerpos de agua; Contaminantes emergentes.

Keywords: Pharmaceuticals; Pollution; Water bodies; Emerging pollutants.

RESUMEN

¿Sabías que los medicamentos que usamos pueden terminar en ríos y océanos? Desde el sanitario hasta el desagüe, estos compuestos llegan a plantas de tratamiento y de ahí, al medio ambiente. La presencia de estos fármacos en el agua puede afectar a peces y otros organismos acuáticos, alterando su reproducción y su desarrollo. El problema se torna más complicado cuando sumamos conductas inapropiadas en el uso de fármacos, como la automedicación y la falta de control en la venta de medicamentos. Sin embargo, no todas son malas noticias. Actualmente se están desarrollando nuevas tecnologías para la remoción de medicamentos en aguas residuales, así como estrategias para evitar que estos lleguen al medio ambiente y cada vez se conoce y se difunde más información sobre esta problemática.

ABSTRACT

Did you know that our pharmaceuticals can end up in rivers and oceans? From the toilet to the drain, these compounds reach treatment plants, and from there, they go into the environment. The presence of these drugs in water can affect fish and other aquatic organisms, altering their reproduction and development. The problem becomes even more complex when we add inappropriate consumer behaviours such as self-medication and a lack of regulation in over-the-counter medicines. However, it's not all bad news. New technologies are being developed for the removal of medications from wastewater, as well as strategies to prevent them from reaching the environment, and more information about this problem is becoming known and disseminated.

INTRODUCCIÓN

Sabemos que la contaminación es uno de los más grandes desafíos que enfrenta la humanidad y que afecta no solo a esta, sino a todos los seres vivos. Si bien algunos contaminantes han sido reconocidos desde hace años debido a su distribución y persistencia en el medio ambiente, recientemente el término “contaminantes emergentes” ha surgido para hacer referencia a aquellos agentes contaminantes que se han convertido en un problema ambiental y que, actualmente, no están bien regulados (Khan *et al.*, 2022).

Estos compuestos, que incluyen desde productos de cuidado personal hasta fármacos, generan una creciente preocupación debido a su impacto potencial en cuerpos de agua y en la salud humana. Entre los contaminantes emergentes más preocupantes se encuentran precisamente los productos farmacéuticos, cuyos residuos sin metabolizar, metabolitos y productos de transformación pueden ingresar al medio ambiente a través de diversas vías, principalmente mediante las descargas de aguas residuales de origen doméstico y hospitalario (Fernandes *et al.*, 2021), así como también los de uso veterinario y acuícola. Se han documentado ampliamente sus efectos adversos tanto en la vida silvestre como en los seres humanos, de acuerdo con numerosos estudios (Sanusi *et al.*, 2023).

Actualmente, se estima que alrededor de 4 mil 800 millones de piezas de medicamentos son consumidas en México, con un incremento del 8% el año pasado (INEFAM, 2024). Este aumento en su consumo es una tendencia que se ha observado de manera global, y en este sentido, el alza en su consumo es una de las principales razones por las que el estudio de fármacos en el ambiente ha cobrado interés. Otras de las causas principales son:

- Su persistencia en el ambiente, ya que muchos fármacos poseen estructuras químicas estables y baja biodegradabilidad, lo que favorece su acumulación y aumenta su impacto como contaminantes emergentes.
- Los riesgos ecológicos potenciales que poseen, como alteraciones hormonales, acumulación en diversos tejidos y toxicidad clínica.
- Los avances tecnológicos, que han permitido desarrollar métodos analíticos para monitorear estos contaminantes en el ambiente, incluso si estos se encuentran en concentraciones extremadamente bajas, mediante la combinación de técnicas como la cromatografía líquida de alta resolución y la espectrometría de masas.

EL CONSUMO DE FÁRMACOS Y SUS CONSECUENCIAS

Los fármacos son sustancias químicas diseñadas para generar un efecto terapéutico en organismos vivos, ya sea para prevenir, tratar o diagnosticar enfermedades. Aunque han mejorado nuestra calidad de vida y han salvado millones de vidas, también plantean desafíos ambientales significativos. Este grupo de contaminantes emergentes incluye diversos productos farmacéuticos, desde drogas ilícitas, hormonas y antibióticos, hasta medicamentos de libre venta como los antiinflamatorios y analgésicos (Khan *et al.*, 2022; Bavumiragira, 2022).

Una vez que se consume un medicamento, una fracción de este no se metaboliza por completo en el cuerpo humano y se excreta a través de la orina o las heces. Estos residuos pueden llegar a las plantas de tratamiento de aguas residuales a través del sistema de alcantarillado; sin embargo, la mayoría de estas plantas no proveen un tratamiento efectivo para la remoción de estos contaminantes y eventualmente, estos compuestos pueden liberarse en cuerpos de agua superficiales y subterráneos. La siguiente tabla presenta los principales fármacos contaminantes y su vida media en el ambiente acuático:

Tabla 1. Vida media de fármacos persistentes en el medio acuático

Fármacos contaminantes	Vida media en el ambiente	Referencia
Diclofenaco (antiinflamatorio)	1-5 días en aguas superficiales, en presencia de luz solar y hasta meses en ambientes de mayor profundidad y turbidez	Avetta et al., 2016
Naproxeno (antiinflamatorio)	1-7 días y hasta meses dependiendo de las condiciones del medio (principalmente exposición a luz solar)	Avetta et al., 2016; Becerril et al., 2025
Paracetamol (antipirético)	5-12 días en agua de río en presencia de luz solar	Alhassen et al., 2023
Sulfametoxazol (antibiótico)	13 días, dependiendo de las condiciones de pH y presencia de materia orgánica	Liu et al., 2021
Fluoxetina (antidepresivo)	1-4 días y sus metabolitos hasta 15 días	Correia et al., 2023

Además, existen otras fuentes de contaminación, como la escorrentía de aguas pluviales, el arrastre de estos contaminantes desde granjas ganaderas y acuícolas, los sistemas sépticos y el desbordamiento de las alcantarillas durante las lluvias (Bavumiragira, 2022).



Figura 1. Imagen ilustrativa de fármacos en ambientes acuáticos. Imagen de libre uso generada por IA.

Uno de los mayores desafíos en este tema, es que los humanos hemos incrementado nuestro consumo de fármacos en las últimas décadas, impulsado por la necesidad de tratar enfermedades crónicas relacionadas con el estilo de vida que hemos llevado en estas últimas décadas; por ejemplo, el consumo de fármacos para tratar los niveles altos de colesterol se ha cuadruplicado, el uso de antidepresivos se ha duplicado y el consumo de medicamentos para tratar la diabetes es también casi el doble en comparación con el año 2000 (González Peña *et al.*, 2021). Además, se ha observado un incremento acelerado en el uso de una gran diversidad de medicamentos derivados de la emergencia mundial sanitaria del COVID-19 (Al Meslamani y Abdel-Qader, 2023).

Este problema se ha visto agravado debido a la práctica indebida de la automedicación, que es sumamente común en diversos países, principalmente en Latinoamérica, con una prevalencia que oscila entre 42% y 88.3%, siendo los antiinflamatorios y antibióticos algunos de los medicamentos más empleados por la

población (Muñoz-García, 2023). La automedicación implica el consumo de medicamentos sin tener una apropiada instrucción y supervisión médica (Doomra y Goyal, 2020). Esta práctica ha llevado a un uso indiscriminado de fármacos para atender todo tipo de padecimientos, desde condiciones relativamente sencillas como un dolor de rodilla pasajero hasta algún padecimiento médico más complejo, como una infección, aumentando así la cantidad y diversidad de fármacos que las personas consumen de manera regular.

Por otro lado, este problema ha empeorado por el hecho de que, en muchos países, incluyendo China, Perú, México y varios países de África, no se requiere receta médica para la prescripción de muchos fármacos, desde antibióticos hasta los populares fármacos antiinflamatorios no esteroideos (AINEs) (Chen *et al.*, 2020; Benites-Mesa *et al.*, 2025; Ortiz *et al.*, 2022; Belachew *et al.*, 2021). Debido a la automedicación, este grupo de medicamentos ha sido asociado a diversos efectos negativos en la salud humana, incluyendo padecimientos como fiebres, alergias, complicaciones cardiovasculares y daño hepático (Doomra y Goyal, 2020) y además han afectado el balance ecológico del medio ambiente, debido a su acumulación en los componentes de diversos ecosistemas (como en el agua y en el sedimento) y en los organismos vivos que los habitan, desde peces hasta vegetación (Fernandes *et al.*, 2021).

LOS MEDICAMENTOS Y EL AMBIENTE

La presencia de fármacos en el ambiente genera preocupación debido a su potencial impacto en la salud de los ecosistemas acuáticos, y, por ende, en su flora y fauna. Se ha demostrado que, aun en concentraciones muy bajas, los fármacos pueden afectar el comportamiento, la reproducción y el desarrollo de organismos acuáticos, como peces y anfibios (Ebele *et al.*, 2017).

El primer paso para evaluar el impacto y el riesgo asociados a la presencia de fármacos en cuerpos de agua es medir sus concentraciones, empleando diversas técnicas analíticas, principalmente cromatografía de gases y cromatografía líquida de alto rendimiento (Ebele *et al.*, 2017). Una vez que se ha medido la concentración de estos contaminantes, es necesario determinar qué efectos tienen en los organismos, por ejemplo, cómo afecta la acumulación de los fármacos en su tamaño, alimentación, conducta reproductiva y relación con otros organismos. Finalmente, es necesario evaluar la salud global del ecosistema midiendo otros parámetros importantes de calidad del agua, como la temperatura, el oxígeno disuelto y el pH. Esto permite comprender cómo la presencia de estos contaminantes podría afectar la cadena alimentaria y sus efectos a largo plazo



Figura 2. Toma de muestras en un humedal de México (Cañón de Fernández, Coahuila). Imagen de autoría propia

en ambientes acuáticos (Khan y Barros, 2023) y, por ende, la acumulación de estos en otros organismos que son consumidos por las poblaciones humanas.

Se ha documentado que medicamentos como el diclofenaco pueden acumularse en diversas especies de peces, con mayores concentraciones en órganos como los riñones y el hígado, seguidos de las branquias y el músculo (Zenker *et al.*, 2014). Algunos fármacos también han sido detectados en crustáceos, moluscos y algas (los estudios de acumulación en plantas son prácticamente inexistentes), siendo el diclofenaco el fármaco más comúnmente encontrado en ambientes acuáticos.

Además, otro problema de gran relevancia y creciente preocupación es el desarrollo de “resistencia microbiana”, es decir, la falta de respuesta de ciertos microorganismos a los fármacos presentes en el medio ambiente debido a la adquisición de mecanismos de resistencia (Church *et al.*, 2021). Este fenómeno ocurre cuando bacterias, virus, parásitos y hongos desarrollan transformaciones que les permiten resistir el efecto de los medicamentos. Cabe señalar que la resistencia antimicrobiana en bacterias ambientales es un proceso natural y frecuente, y cumple un papel importante en el equilibrio ecológico de las comunidades microbianas. Sin embargo, cuando estos mecanismos de resistencia se manifiestan en bacterias de interés médico, como las asociadas a infecciones humanas, se convierten en un grave problema de salud pública. Esto significa que las infecciones que antes eran tratables no pueden ser tratadas por medio de fármacos convencionales, lo cual se traduce en la propagación de enfermedades, el desarrollo de padecimientos más graves y, en consecuencia, un aumento en la mortalidad de los pacientes. Este problema es particularmente grave en el caso del uso de antibióticos, pues se ha observado un incremento en el número de bacterias resistentes a estos medicamentos; incluso algunas

cepas han demostrado resistencia a más de 100 tipos de antibióticos (Mackulak *et al.*, 2019). Estas bacterias pueden ser liberadas al ambiente por medio de las descargas provenientes de plantas de tratamiento de aguas residuales y conforme aumenta la utilización de aguas tratadas, también aumenta la preocupación de que se introduzcan antibióticos y bacterias resistentes en los sistemas de potabilización de agua. Esto podría representar un riesgo en la salud humana, al aumentar la exposición de las poblaciones humanas a microorganismos resistentes.

¿QUÉ MEDIDAS SE ESTÁN TOMANDO PARA PREVENIR LA CONTAMINACIÓN POR FÁRMACOS?

Por otro lado, la presencia de fármacos en el agua potable también genera preocupaciones para la salud humana. Aunque las concentraciones de estos compuestos en el agua potable generalmente son muy bajas, existe el riesgo de exposición a largo plazo a una variedad de compuestos farmacéuticos, cuyos efectos a lo largo del tiempo aún no se comprenden completamente.

Para abordar este problema de manera efectiva, es fundamental implementar medidas de gestión adecuadas, incluyendo la mejora de las prácticas de eliminación de medicamentos vencidos o no utilizados y la promoción de programas de devolución de medicamentos. Además, es necesario invertir en tecnologías avanzadas de tratamiento de aguas residuales que puedan eliminar eficazmente los residuos de fármacos antes de que entren en el medio ambiente.

Se ha reportado la presencia de una gran variedad de fármacos tanto en efluentes como en afluentes de plantas de tratamiento de agua residual

(Frascaroli et al., 2021). La cantidad y el tipo de estos contaminantes dependen de varios factores como la dinámica socioeconómica de la población, sus patrones de consumo, las condiciones climáticas y ambientales del lugar. A pesar de que las concentraciones de estos contaminantes son relativamente bajas, podrían presentar efectos negativos si estos son liberados al medio ambiente. Por esta razón, se ha explorado el uso de tratamientos para eliminarlos al igual que otros contaminantes presentes en el agua residual.

La remoción de medicamentos en las plantas de tratamiento, particularmente en la fase secundaria, donde se emplean microorganismos para descomponer la materia orgánica en componentes más simples (como dióxido de carbono y agua), puede no ser eficiente, pues su efectividad depende de varios elementos como la temperatura, la estación del año, el pH, las condiciones de oxidación-reducción, entre otras. Es por esta razón que muchas plantas de tratamiento incorporan un tratamiento terciario que puede incluir membranas, reactores de biomembrana, filtros de arena, radiación UV y cloración. Una de las estrategias con mayor efectividad para la remoción de fármacos es la combinación de varias técnicas, por ejemplo, la ozonización con materiales adsorbentes como el carbón

activado (incluyendo antiinflamatorios, antiepilépticos y hormonas) (Mackulak et al., 2019).

Si no es posible evitar que los productos farmacéuticos entren al ambiente, existen diversas estrategias para removerlos. Dentro de estas, se encuentra el uso de materiales adsorbentes, incluyendo carbón activado, nanomateriales, arcillas, residuos de agricultura (p. ej. paja de maíz o de arroz), entre otros. Estos materiales tienen la capacidad de “atrapar” a los fármacos, ya sea utilizados directamente o con algún tratamiento previo en el laboratorio. Un ejemplo clásico es el carbón activado, que ha sido empleado para retener fármacos y otros contaminantes: en un estudio donde se utilizó carbón activado en polvo para eliminar 29 antibióticos diferentes de agua superficial, se logró una tasa de eliminación de hasta el 99.7 % (Vinayagam et al., 2022).

Otra estrategia con gran potencial es la biorremediación, cuyo uso se ha promovido en los últimos años, por ser ambientalmente amigable. Esta estrategia consiste en emplear organismos vivos para remover alguna sustancia y recuperar las condiciones ambientales originales de un ecosistema. Para la remoción de fármacos, se han empleado diversas especies de plantas y hongos con capacidad para acumular estos contaminantes (Tabla 2). Los hongos, en particular,



Figura 3. Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Chihuahua Norte, Chihuahua, México. Imagen de autoría propia.

han demostrado una alta capacidad para absorber y acumular contaminantes persistentes. Además, su resistencia a los cambios ambientales les permite adaptarse a condiciones extremas. Particularmente en el caso de fármacos, se ha documentado que algunas especies de hongos son capaces de eliminar betabloqueadores, psicoactivos, hormonas, antiinflamatorios y antibióticos, con porcentajes de

eliminación cerca del 100% en solo cuestión de días (Vinayagam *et al.*, 2022).

* La adsorción es la adhesión de átomos, iones o moléculas de un gas, líquido o sólido disuelto a una superficie.

Tabla 2. Especies de microorganismos, plantas y hongos empleados en la biorremediación de fármacos en el ambiente

Tipo de organismo	Especie/ género	Aplicación principal en biorremediación de fármacos	Referencia
Hongo	<i>Trametes versicolor</i>	Oxidación de antiinflamatorios	Llorens-Blanch <i>et al.</i> , 2015
Planta acuática	<i>Eichhornia crassipes</i> (jacinto de agua)	Fitorremediación de analgésicos y metales	Madikizela, 2021
Planta acuática	<i>Typha latifolia</i>	Fitorremediación de antiinflamatorios y fármacos psicotrópicos	Pérez <i>et al.</i> , 2023
Hongo	<i>Pleurotus ostreatus</i>	Remoción de antidepresivos	Kózka <i>et al.</i> , 2023

CONCLUSIONES

La presencia de fármacos en el ambiente constituye actualmente un problema emergente y en expansión, evidenciado por su detección cada vez más frecuente en ríos, lagos, acuíferos y efluentes de plantas de tratamiento alrededor del mundo. La situación muestra una tendencia preocupante al aumento, asociada al crecimiento poblacional, al incremento sostenido en el consumo de medicamentos y a la limitada capacidad de los sistemas de tratamiento convencionales para eliminarlos de manera efectiva.

Frente a este escenario, es necesario implementar medidas efectivas para reducir la introducción de fármacos en el medio ambiente, lo que incluye:

- Mejorar la gestión de residuos farmacéuticos en hogares, hospitales y farmacias.
- Desarrollar tecnologías avanzadas de tratamiento de aguas residuales que combinen procesos físicos, químicos y biológicos para optimizar la remoción de contaminantes emergentes.
- Fortalecer las regulaciones para limitar la venta y el desecho inadecuado de medicamentos
- Fomentar programas de educación y sensibilización ciudadana para reducir la disposición inapropiada de fármacos.

Además, se necesita aumentar los esfuerzos de investigación para poder comprender mejor los efectos de los fármacos en los ecosistemas acuáticos y en la salud humana, así como para desarrollar estrategias de mitigación adecuadas. Solo a través de un enfoque integral y colaborativo podremos abordar eficazmente este desafío y proteger tanto el medio ambiente como la salud de los organismos y la salud humana.

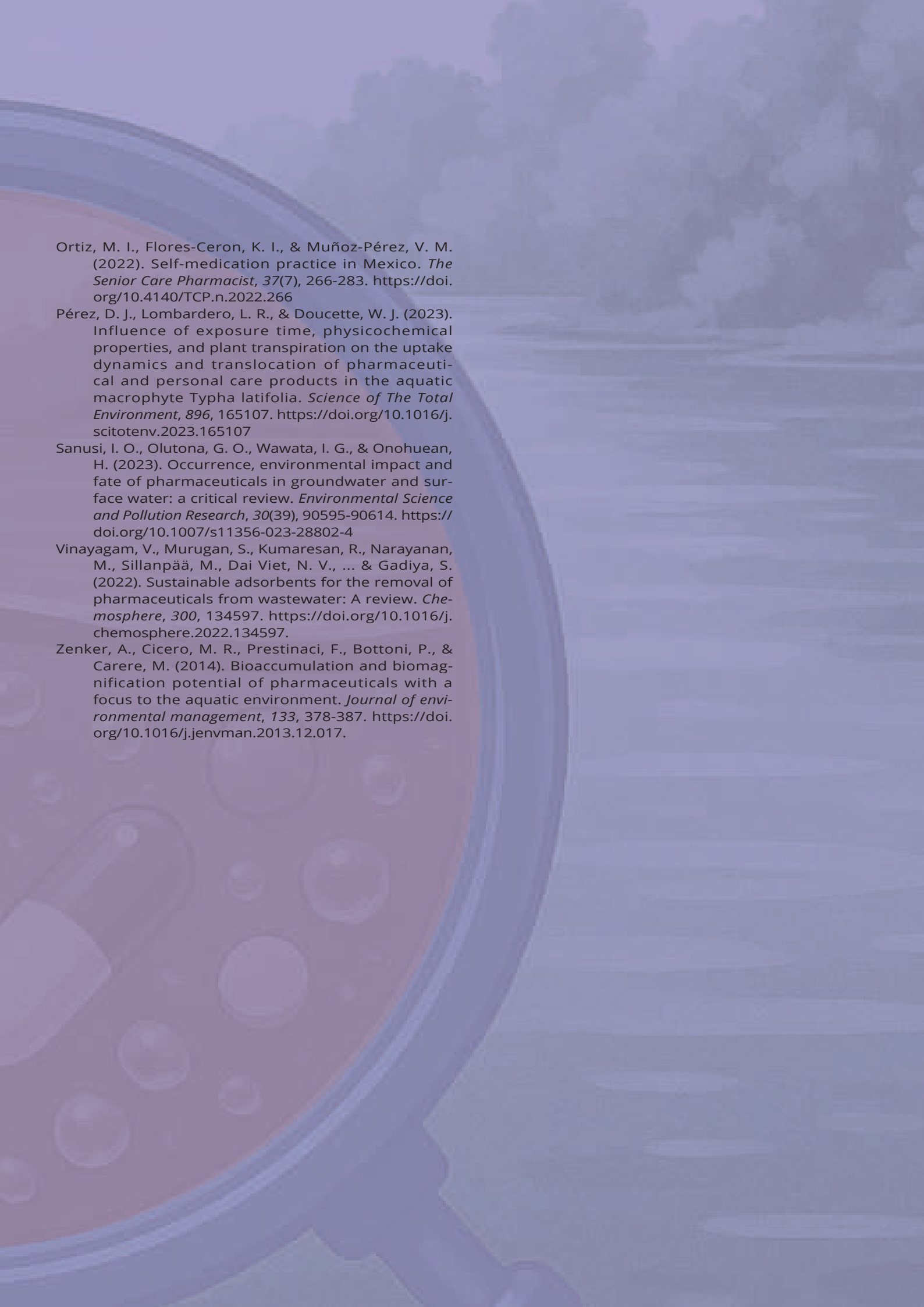
Una gestión adecuada de los residuos farmacéuticos y la reducción de su impacto ambiental son acciones fundamentales para garantizar un futuro sostenible para las generaciones venideras, especialmente en un mundo donde la población crece exponencialmente y con ello nuestras necesidades farmacéuticas también aumentan. Adoptar un enfoque proactivo ante el aumento en el consumo de fármacos es esencial para preservar la integridad de nuestros ecosistemas y proteger la salud de nuestra sociedad.



Literatura citada



- Al Meslamani, A. Z., & Abdel-Qader, D. H. (2023). The abuse and misuse of over-the-counter medicines during COVID-19. *Hospital Pharmacy*, 58(5), 437-440. <https://doi.org/10.1177/00185787231158777>
- Avetta, P., Fabbri, D., Minella, M., Brigante, M., Maurino, V., Minero, C., ... & Vione, D. (2016). Assessing the phototransformation of diclofenac, clofibrac acid and naproxen in surface waters: model predictions and comparison with field data. *Water research*, 105, 383-394. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2016.08.058>
- Bavumiragira, J. P., & Yin, H. (2022). Fate and transport of pharmaceuticals in water systems: A processes review. *Science of The Total Environment*, 823, 153635. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.153635>
- Becerril Ortiz, M. E., & Ramírez García, J. J. (2025). Review of physicochemical processes of naproxen and its byproduct toxicity in aquatic environment. *Environmental Technology Reviews*, 14(1), 781-796. <https://doi.org/10.1080/21622515.2025.2545634>
- Belachew, S. A., Hall, L., & Selvey, L. A. (2021). Non-prescription dispensing of antibiotic agents among community drug retail outlets in Sub-Saharan African countries: a systematic review and meta-analysis. *Antimicrobial Resistance & Infection Control*, 10(1), 13. <https://doi.org/10.1186/s13756-020-00880-w>
- Benites-Meza, J. K., Pinedo-Castillo, L., Cabanillas-Lazo, M., Boyd-Gamarra, M. A., Herrera-Añazco, P., Mougnot, B., & Benites-Zapata, V. A. (2025). Self-medication with NSAIDs and purchase of branded and over-the-counter medicines: Analysis of a national survey in Peru. *Journal of Public Health Research*, 14(1), 22799036251319154. <https://doi.org/10.1177/2279903625131915>
- Chen, J., Wang, Y., Chen, X., & Hesketh, T. (2020). Widespread illegal sales of antibiotics in Chinese pharmacies—a nationwide cross-sectional study. *Antimicrobial Resistance & Infection Control*, 9(1), 12. <https://doi.org/10.1186/s13756-019-0655-7>
- Church, N. A., & McKillip, J. L. (2021). Antibiotic resistance crisis: challenges and imperatives. *Biología*, 76(5), 1535-1550. <https://doi.org/10.1007/s11756-021-00697-x>
- Doomra, R., & Goyal, A. (2020). NSAIDs and self-medication: A serious concern. *Journal of Family Medicine and Primary Care*, 9(5), 2183-2185. https://doi.org/10.4103/jfmpc.jfmpc_201_20
- Ebele, A. J., Abdallah, M. A. E., & Harrad, S. (2017). Pharmaceuticals and personal care products (PPCPs) in the freshwater aquatic environment. *Emerging contaminants*, 3(1), 1-16. <https://doi.org/10.1016/j.emcon.2016.12.004>
- Fernandes, J. P., Almeida, C. M. R., Salgado, M. A., Carvalho, M. F., & Mucha, A. P. (2021). Pharmaceutical compounds in aquatic environments—occurrence, fate and bioremediation prospective. *Toxics*, 9(10), 257. <https://doi.org/10.3390/toxics9100257>
- Frascaroli, G., Reid, D., Hunter, C., Roberts, J., Helwig, K., Spencer, J., & Escudero, A. (2021). Pharmaceuticals in wastewater treatment plants: A systematic review on the substances of greatest concern responsible for the development of antimicrobial resistance. *Applied sciences*, 11(15), 6670. <https://doi.org/10.3390/app11156670>
- González Peña, O. I., López Zavala, M. Á., & Cabral Ruelas, H. (2021). Pharmaceuticals market, consumption trends and disease incidence are not driving the pharmaceutical research on water and wastewater. *International journal of environmental research and public health*, 18(5), 2532. <https://doi.org/10.3390/ijerph18052532>
- Inefam. Tablero de indicadores de salud en México. (2024). Disponible en “Booklet” de Indicadores: Tablero-de-indicadores-S-FVv1.pdf (inefam.com). Consultado el 25 de junio, 2024.
- Khan, A. H. A., & Barros, R. (2023). Pharmaceuticals in water: risks to aquatic life and remediation strategies. *Hydrobiology*, 2(2), 395-409. <https://doi.org/10.3390/hydrobiology2020026>
- Khan, S., Naushad, M., Govarthanan, M., Iqbal, J., & Alfadul, S. M. (2022). Emerging contaminants of high concern for the environment: Current trends and future research. *Environmental Research*, 207, 112609. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.112609>
- Kózka, B., Sośnicka, A., Nałęcz-Jawecki, G., Drobnińska, A., Turło, J., & Giebułtowski, J. (2023). Various species of Basidiomycota fungi reveal different abilities to degrade pharmaceuticals and also different pathways of degradation. *Chemosphere*, 338, 139481. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.139481>
- Liu, X., Wang, Z., Zhang, L., Fan, W., Yang, C., Li, E., ... & Wang, X. (2021). Inconsistent seasonal variation of antibiotics between surface water and groundwater in the Jiangnan Plain: Risks and linkage to land uses. *Journal of Environmental Sciences*, 109, 102-113. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2021.03.002>
- Llorens-Blanch, G., Badia-Fabregat, M., Lucas, D., Rodríguez-Mozaz, S., Barceló, D., Pennanen, T., ... & Blánquez, P. (2015). Degradation of pharmaceuticals from membrane biological reactor sludge with *Trametes versicolor*. *Environmental Science: Processes & Impacts*, 17(2), 429-440. <https://doi.org/10.1039/C4EM00579A>
- Mackulák, T., Černanský, S., Fehér, M., Birošová, L., & Gál, M. (2019). Pharmaceuticals, drugs, and resistant microorganisms—environmental impact on population health. *Current Opinion in Environmental Science & Health*, 9, 40-48. <https://doi.org/10.1016/j.coesh.2019.04.002>
- Madikizela, L. M. (2021). Removal of organic pollutants in water using water hyacinth (*Eichhornia crassipes*). *Journal of environmental management*, 295, 113153. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113153>
- Muñoz García, B. L. (2023). Automedicación y factores asociados en América Latina. Revisión Bibliográfica. <https://doi.org/10.59590/upsjb/fcs.med.hum/tesis/4478>

- 
- Ortiz, M. I., Flores-Ceron, K. I., & Muñoz-Pérez, V. M. (2022). Self-medication practice in Mexico. *The Senior Care Pharmacist*, 37(7), 266-283. <https://doi.org/10.4140/TCP.n.2022.266>
- Pérez, D. J., Lombardero, L. R., & Doucette, W. J. (2023). Influence of exposure time, physicochemical properties, and plant transpiration on the uptake dynamics and translocation of pharmaceutical and personal care products in the aquatic macrophyte *Typha latifolia*. *Science of The Total Environment*, 896, 165107. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.165107>
- Sanusi, I. O., Olutona, G. O., Wawata, I. G., & Onohuean, H. (2023). Occurrence, environmental impact and fate of pharmaceuticals in groundwater and surface water: a critical review. *Environmental Science and Pollution Research*, 30(39), 90595-90614. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-28802-4>
- Vinayagam, V., Murugan, S., Kumaresan, R., Narayanan, M., Sillanpää, M., Dai Viet, N. V., ... & Gadiya, S. (2022). Sustainable adsorbents for the removal of pharmaceuticals from wastewater: A review. *Chemosphere*, 300, 134597. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.134597>
- Zenker, A., Cicero, M. R., Prestinaci, F., Bottoni, P., & Carere, M. (2014). Bioaccumulation and biomagnification potential of pharmaceuticals with a focus to the aquatic environment. *Journal of environmental management*, 133, 378-387. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2013.12.017>



EL CACTUS DE BARRIL:

PROPAGACIÓN MEDIANTE
EL CULTIVO *IN VITRO*

/// SANDRA PÉREZ-ÁLVAREZ^{1*}, EDUARDO FIDEL HÉCTOR ARDISANA²,
RODOLFO CONTRERAS MARTINEZ¹



Palabras clave: biotecnología, cactus, especie vulnerable.

Key words: biotechnology, cactus, vulnerable species.

RESUMEN

De las aproximadamente 1500 especies que integran la familia *Cactaceae*, unas 700 habitan en México. Entre ellas se encuentra *Ferocactus wislizeni* Britton & Rose, cuyo nombre común es biznaga de agua o cactus de barril. Esta es una de las especies de cactus consideradas como vulnerables, lo que se debe a diversos factores, entre ellos su uso ornamental y la modificación de su hábitat original por la agricultura y la ganadería. Ante las limitaciones en la reproducción sexual de esta y otras cactáceas, una alternativa promisoría es el uso de técnicas de multiplicación *in vitro*, que utilizan reguladores de crecimiento en medios de cultivo para estimular la propagación. En este artículo se describe la distribución de las cactáceas en América, generalidades sobre el cactus de barril, los rasgos más importantes de las técnicas de cultivo *in vitro* y la aplicación de esta biotecnología en especies afines.

ABSTRACT

Of the approximately 1,500 species that make up the *Cactaceae* family, around 700 are found in Mexico. Among them is *Ferocactus wislizeni* Britton & Rose, commonly known as the water barrel cactus or simply barrel cactus. This is one of the cactus species considered vulnerable, due to various factors including its ornamental use and the alteration of its natural habitat by agriculture and livestock. Given the limitations in the sexual reproduction of this and other cacti, a promising alternative is the use of *in vitro* propagation techniques, which employ growth regulators in culture media to stimulate propagation. This article describes the distribution of cacti in the Americas, general information about the barrel cactus, the key features of *in vitro* cultivation techniques, and the application of this biotechnology to related species.

¹ Universidad Autónoma de Chihuahua, Facultad de Ciencias Agrícolas y Forestales, Km. 2.5 carretera a Rosales, Poniente, CP 33000, Delicias, Chihuahua, México; spalvarez@uach.mx

² Facultad de Posgrado, Universidad Técnica de Manabí, Avenida Urbina y Che Guevara, CP 130105, Portoviejo, Ecuador.

INTRODUCCIÓN

México alberga la mayor diversidad de cactus a nivel mundial, con alrededor de 700 especies, predominando en las regiones áridas y semiáridas del norte del país. La familia *Cactaceae* comprende aproximadamente 1500 especies, en su mayoría originarias del continente americano.

Una de ellas, *Ferocactus wislizeni* Britton & Rose, comúnmente conocida como biznaga de agua o cactus de barril por su forma característica, se encuentra actualmente en estado de conservación vulnerable. Esto se debe a la disminución de sus poblaciones como consecuencia de la destrucción de su hábitat por el cambio en el uso del suelo, actividades agrícolas y ganaderas, así como la extracción ilegal con fines ornamentales.

Además, la reproducción sexual de muchas cactáceas enfrenta limitaciones como la escasa producción de semillas, bajas tasas de germinación, crecimiento lento y reducida supervivencia de plántulas, lo que amenaza su permanencia en ambientes naturales.

La germinación *in vitro* ofrece una alternativa eficaz, ya que puede superar la inhibición germinativa, incrementar la tasa de germinación, acortar los tiempos y lograr una mayor uniformidad. Este método emplea fitohormonas como reguladores del crecimiento, que actúan como señales químicas para inducir procesos clave en el desarrollo vegetal, como la formación de hojas y flores, la fructificación o la caída de hojas en etapas específicas del ciclo de vida de la planta.

EVOLUCIÓN Y DISTRIBUCIÓN DE LAS CACTÁCEAS EN EL CONTINENTE AMERICANO

Desde una perspectiva evolutiva, las cactáceas surgieron tras los cambios climáticos ocurridos en el Eoceno medio en América del Norte, hace aproximadamente 45 millones de años. Durante ese periodo, predominaban comunidades vegetales con abundantes coníferas adaptadas a temperaturas 3 y 5 °C. Al iniciarse el Oligoceno, entre hace 24 y 35 millones de años, se produjo una acidificación general del suelo, un aumento de la temperatura hasta los 25 °C y una reducción en la precipitación, que además se volvió más estacional. Estos cambios provocaron una transformación significativa en la vegetación: disminuyeron los bosques templados y se incrementó la vegetación abierta, similar a las sabanas o estepas actuales (Berggren y Prothero, 1992).

En este contexto surgieron nuevos tipos de vegetación, localizados entre extensas áreas de bosques tropicales,

como lo evidencian los fósiles encontrados. Las primeras formas de cactáceas, similares al género ancestral *Pereskia*, aparecieron aproximadamente hace 32 millones de años, en el Eoceno tardío, junto con muchas otras familias de plantas actuales, después de un evento de extinción masiva a escala global (Axelrod, 1979; Berggren y Prothero, 1992).

Considerando el momento y lugar de su origen evolutivo, es lógico suponer que los cactus se distribuyan de forma natural únicamente en el continente americano, lo cual es en gran medida cierto. La mayor diversidad de especies nativas de cactáceas se concentra en el tercio sur de América del Norte, incluyendo las islas del Caribe, así como en la parte norte de América del Sur. A medida que se avanza hacia el norte o el sur del continente, la abundancia de estas plantas disminuye; sin embargo, algunas especies logran extenderse hasta el norte de Canadá y las regiones más australes de Argentina y el sur de Chile (Nobel, 1998).

ORIGEN Y DISTRIBUCIÓN GEOGRÁFICA DEL CACTUS DE BARRIL

La familia *Cactaceae*, originaria del continente americano, se encuentra distribuida mayormente en zonas áridas y semiáridas (Anderson, 2001). A nivel mundial, se han identificado cerca de 1900 especies distribuidas en 125 géneros (Jiménez-Sierra, 2011). México destaca como el principal centro de evolución y diversificación de esta familia, albergando aproximadamente 68 géneros y 669 especies. De estas, 518 son endémicas, lo que representa un 77 %, evidenciando su alto grado de endemismo (Cota-Sánchez, 2008; Guzmán et al., 2007).

De los 275 taxones de cactáceas listados en la NOM-059-SEMARNAT-2010, diez pertenecen al género *Ferocactus*. Estas especies, comúnmente denominadas “biznagas” o “cactus de barril”, destacan por su forma esférica y el atractivo color de sus flores y se encuentran distribuidas en regiones cálidas y secas del suroeste de los Estados Unidos y del norte de México (Arias et al., 2012).

El cactus de barril es originario del Desierto de Chihuahua y de Sonora, México, y puede adaptarse a los cambios climáticos en su hábitat (Cortés et al., 2014). Se puede sembrar en suelos poco fértiles, arenosos o pedregosos, a altitudes que oscilan entre 300 y 1600 m, con exposición directa al sol, por lo que crece y se desarrolla en climas cálidos y áridos. También es tolerante a las heladas de hasta -15 °C (Faucon et al., 2017).

Anderson (2001) plantea que las especies pertenecientes al género *Ferocactus* habitan en diversas comunidades

vegetales, predominando en el matorral xerófilo, y su distribución abarca desde el suroeste de Estados Unidos hasta el estado de Oaxaca en México. En particular, una gran concentración de estas especies se localiza en la Península de Baja California y en la región del desierto Sonorense.

GENERALIDADES DE *FEROCACTUS WISLIZENI* BRITTON & ROSE

El *Ferocactus wislizeni* fue descrito por primera vez por el botánico y explorador alemán George Engelmann en 1853. Engelmann nombró la especie en honor a Friedrich Wislizenus, un médico y explorador alemán que recolectó especímenes de plantas en el suroeste de los Estados Unidos a mediados del siglo XIX. El autor de la taxonomía actual de *Ferocactus wislizeni* es David Hunt, un reconocido experto en cactus y suculentas. En su obra "The New Cactus Lexicon", publicada en 2006, Hunt et al., revisaron la taxonomía de *Ferocactus* y otras especies de cactus y proporcionaron una descripción detallada de cada especie, incluyendo *Ferocactus wislizeni* (Figura 1).

La descripción actual taxonómica del cultivo según Hunt et al. (2006) es la siguiente:

Reino: Plantae	Subfamilia: Cactoideae
División: Magnoliophyta	Tribu: Cacteae
Clase: Magnoliopsida	Género: Ferocactus
Orden: Caryophyllales	Especies: Ferocactus wislizeni
Familia: Cactaceae Juss	



Figura 1. *Ferocactus wislizeni* Britton & Rose (cactus de barril) (Fuente: autores).



Figura 2. Fruto y semillas de *Ferocactus wislizeni* Britton & Rose (cactus de barril) (Fuente: autores).

Anderson (2001) describe esta especie como un cactus de forma globular, con la parte superior deprimida y plana, color verde grisáceo. Su tallo varía de 60 cm a 3 m de altura, y de 45 cm a 80 cm de diámetro. A lo largo del tallo, se presentan de 20 a 28 costillas longitudinales de 3 cm de altura. Posee aureolas grandes, ovales, en las protuberancias a lo largo de las costillas de 2.5 cm de longitud, con lana de color castaño de jóvenes. Espinas variables en número, generalmente 4 espinas centrales por aureola, dispuestas en cruz, las más grandes de 3,8 cm a 5 cm de longitud, y de 12 a 20 espinas radiales de 4,5 cm de longitud. Las flores infundibuliformes (de aspecto de embudo), son de color rojo o amarillo, se forman en la cima del tallo, de 4 a 5 cm de longitud y diámetro. Florece esporádicamente al final de la primavera y abundantemente en el verano.

La fruta es de color amarillo (Figura 2), de 5 cm de longitud y 3 de diámetro, en forma de barril, provisto de escamas carnosas ciliadas al madurar, lo cual ocurre durante el otoño. Esta cactácea llega a producir hasta 30 000 semillas

por año, las cuales son redondeadas o a veces anguladas, de 2.25 a 2.5 mm, con testa alveolada y arrugada. Las raíces son poco profundas, confinadas a las capas superiores del suelo. Posee una raíz principal de anclaje que se extiende a una profundidad de 2 cm, mientras tiene otras raíces laterales más cortas. Las raíces son a menudo expuestas después de la lluvia.

Ferocactus wislizeni se reproduce por semillas, que son dispersadas por aves y roedores. La germinación se produce mejor a una temperatura de 20 a 30 °C después de estar expuestas a 8 horas de luz. Sus semillas no germinan en la oscuridad y posee una vida de 50 a 130 años (Scheinvar et al., 2008).

En un estudio realizado por McIntosh (2002) analizó la biología reproductiva de *F. wislizeni*, teniendo en cuenta la producción de flores, formación de frutos, número de semillas por fruto, masa de semillas, tamaño y crecimiento de las plantas, así como la polinización. Los resultados obtenidos demostraron que algunos individuos eran capaces de autopolinizarse, pero generando escasas semillas lo que indicó una alta depresión endogámica, aunque no hubo limitación de polen. En cuanto a la producción de flores estas se incrementaron con el tamaño de las plantas, sugiriéndose una relación entre este y el número de semillas por fruto; la masa de las semillas no tuvo relación con el tamaño de la planta. En cuanto a la producción reproductiva, se generó una cantidad de flores aceptable, con un buen número y peso de las semillas, así como un alto porcentaje de cuajado de frutos (94-96%). El crecimiento de esta especie estuvo relacionado con las lluvias de la temporada previa y con la edad.

CULTIVO *IN VITRO* O MICROPROPAGACIÓN

Una alternativa para enfrentar las limitaciones de la reproducción sexual en plantas es el cultivo *in vitro*, una forma de propagación asexual realizada en condiciones controladas. Esta técnica, cuyo nombre proviene del latín "*in vitro*" ("*en vidrio*"), se considera más

rápida y confiable en comparación con la germinación convencional. El cultivo *in vitro*, como herramienta biotecnológica, permite regenerar plantas completas a partir de fragmentos de tejido como tallos, hojas, yemas axilares o terminales, o incluso semillas, seleccionadas de una planta madre con características deseables como sanidad, alta productividad o resistencia a factores bióticos y abióticos (Fert y Paul, 2000).

La reproducción asexual de plantas por cultivo *in vitro* es posible gracias a que, en general, varias células de un individuo vegetal poseen la capacidad necesaria para permitir el crecimiento y el desarrollo de un nuevo individuo completo, sin que medie ningún tipo de fusión de células sexuales o gametos. Esta capacidad se denomina totipotencialidad celular, y es característica de un grupo de células vegetales conocidas como células meristemáticas, presentes en los distintos órganos de la planta (Lackie y Dow, 1989).

La tecnología del cultivo *in vitro* abarca varias fases que según Bihari et al. (2022) son:

- 1. Establecimiento:** Se selecciona la planta madre y la parte de la planta a utilizar. En el caso del cactus de barril se han utilizado semillas, las cuales son duras, por lo que es necesario ablandar la cubierta con métodos químicos o físicos a lo que se le llama escarificación, y luego se desinfecta este material, por lo que para garantizar la germinación de las semillas *in vitro* se utilizaron dos tratamientos combinando la escarificación química (ácido sulfúrico concentrado- H_2SO_4 por 10 y 5 minutos) y física (corte de la semilla en el lado opuesto al embrión) (Figura 3). La desinfección se realizó inmediatamente después de escarificar las semillas con hipoclorito de sodio al 2% durante 20 min, enjuagar con agua destilada-estéril y colocar las semillas en un medio de cultivo con agar-agua.
- 2. Multiplicación:** En esta fase se adicionan sustancias reguladoras del crecimiento, fundamentalmente

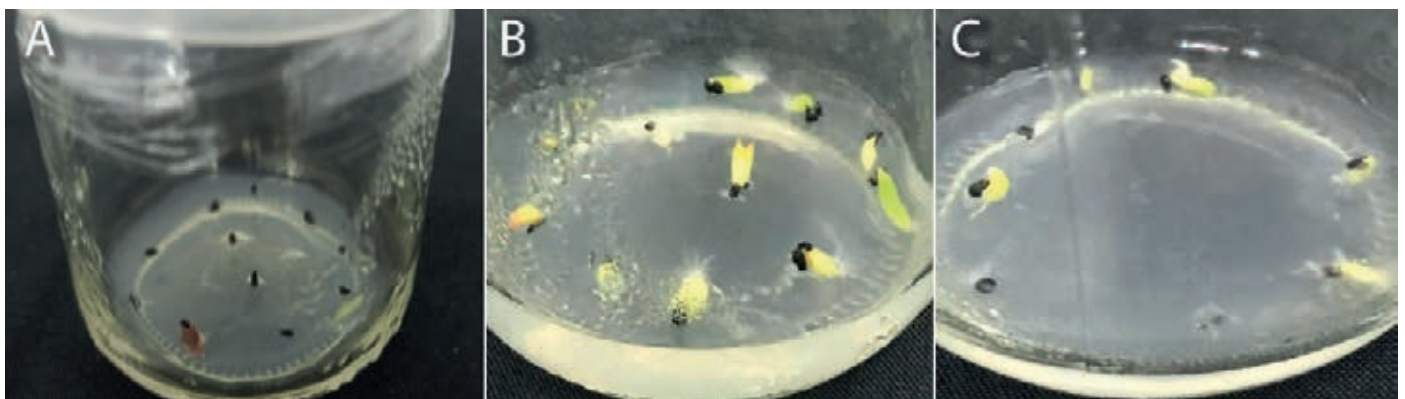


Figura 3. Germinación de las semillas *F. wislizeni* en medio agar agua donde A: Control; B: Inmersión en H_2SO_4 por 10 minutos y corte; C: Inmersión en H_2SO_4 por 5 minutos y corte (Fuente: autores).

se combinan auxinas y citoquininas, y se van a obtener muchas plantas idénticas a la planta madre. Se utilizaron tratamientos en el cactus de barril combinándose dos citoquininas (6 Bencilaminopurina-6BAP y Kinetina-Kin) y una auxina (Ácido indolacético-AIA) y los mejores resultados se obtuvieron al combinar Kin 0.3 mg L⁻¹ + AIA 0.2 mg L⁻¹, con una altura promedio de los explantes (plántula *in vitro*) de 16 cm y un coeficiente de multiplicación de 4 (cuantos explantes se obtienen de uno sola) (Figura 4).

3. **Enraizamiento:** Es la formación de raíces de un solo explantes, generalmente se utilizan auxinas como el AIA o el AIB (Ácido indolbutírico).
4. **Aclimatación:** Adaptar las plántulas a condiciones *ex vitro*, es decir, al ambiente externo en cual deberá crecer y desarrollarse.

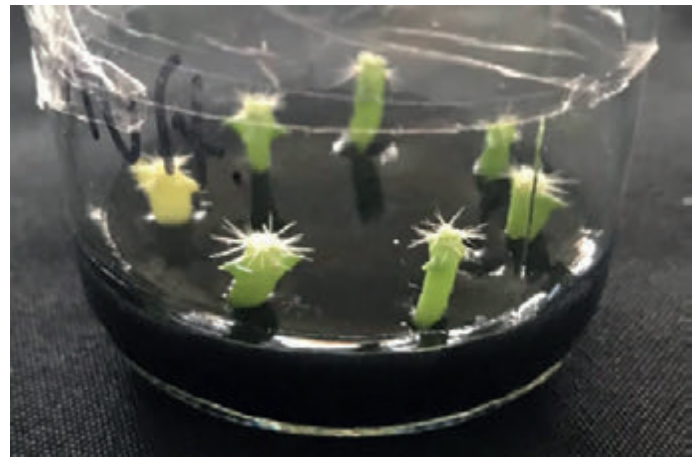


Figura 4. *F. wislizeni* en medio de multiplicación con Kin 0.3 mg L⁻¹ + AIA 0.2 mg L⁻¹ y carbón activado (limita la formación de tejido necrosado) (Fuente: autores).

El cultivo *in vitro* es una herramienta poderosa para conservar la biodiversidad sino también para multiplicar no solo y preservar especies de plantas que están amenazadas, vulnerables o en peligro de extinción. Gracias a este método, el cactus de barril podrá recuperar su estatus de especie no vulnerable e incluso se podrá ofertar para que las personas la adquieran sin tener que sacarlas de su hábitat natural, lo que abre nuevas posibilidades para su reintroducción en su hábitat natural, el uso sostenible y la investigación científica, contribuyendo de forma significativa a la protección del patrimonio vegetal del planeta.

CULTIVO IN VITRO DEL CACTUS DE BARRIL

Generalmente, las semillas de las *cactaceae* presentan distintos niveles de latencia, lo que suele retrasar la germinación, proceso que se ve influenciado por condiciones ambientales como la disponibilidad de agua, la luz, y la temperatura, siendo la escasez de agua el factor limitante más importante (Bauk et al., 2016). El aumento de la tasa y el porcentaje de germinación de estas plantas es fundamental para incrementar su población por lo que se han adoptado diversas técnicas como la escarificación mecánica (abrasión manual, remojo en diferentes tipos de sustancias, incisiones en la testa de la semilla, etc.,) con el objetivo de simular el desgaste natural para alterar la testa y facilitar la germinación (Rodríguez et al., 2019), y la escarificación química utilizando ácido sulfúrico para simular la digestión animal, de modo que la testa se vuelva más permeable y, por lo tanto, acelerar la germinación (Koi et al., 2016).

La reproducción sexual dentro de esta familia puede verse comprometida por diversos factores que amenazan la viabilidad de sus poblaciones en el entorno

natural. Entre estos factores se encuentran la escasa producción de semillas (Choreño-Tapia et al., 2002), el lento desarrollo y la baja supervivencia de las plántulas (Arellano et al., 2013), así como las reducidas tasas de germinación (Rodríguez et al., 2013).

Actualmente, la información disponible sobre el desarrollo de técnicas de escarificación y propagación *in vitro* para la especie *F. wislizeni* es limitada, por lo que abordaremos literatura existente en otras especies cuyas metodologías pueden extrapolarse al cactus de barril.

La biznaga barril de oro (*Echinocactus grusonii* Hildm.), es una especie que se encuentra en peligro de extinción y su propagación es escasa porque no genera brotes de manera natural (Guzmán et al., 2003) por lo que establecer la metodología *in vitro* tiene una gran importancia. Villavicencio-Gutiérrez et al. (2023) utilizaron el medio Murashige (1974) al 50% para establecer segmentos nodales con yemas axilares como explante evaluándose dos tipos de citoquininas: 6 BAP y Kin en concentraciones de 2.5, 5.0 7.5 y 10.0 mg L⁻¹, interactuando con dos auxinas (ANA y AIB) en relación citoquinina-auxina 10:1. Los resultados obtenidos mostraron que con la 6BAP el número de brotes fue mayor y los explantes cultivados en el medio suplementado con 7.5 mg L⁻¹ de 6BAP + 0.75 mg L⁻¹ AIB, tuvieron un coeficiente de multiplicación de 6.0 brotes/explante, con una altura de 3.85 mm.

García-González et al. (2022) investigaron diferentes métodos de escarificación (control (semillas intactas), aplicación de H₂SO₄ al 25 %, escarificación mecánica (quitar un 50% de la testa con pinza y bisturí), y medio Murashige y Skoog (MS, 1962)) adicionado con 2 mg L⁻¹ de ácido giberélico-AG3 para la especie *Echinocactus parryi* (Engelm.) teniendo en cuenta dos grupos, uno con semillas que pesaban de 35 to 45 mg y el otro de 46 to

55 mg. Los resultados mostraron que la escarificación mecánica dio los mejores resultados con porcentajes del 93 al 96% para cada grupo de semillas, seguida del tratamiento con H_2SO_4 donde el grupo con menos peso germinaron un 12.8% de las semillas y en el otro grupo un 39.4%. En el medio MS suplementado con AG3 se obtuvieron los menores valores de germinación (9.4% y 6.8% en cada grupo de semillas).

El estudio de Rodríguez-Ruiz et al. (2018) abordó la germinación *in vitro* de semillas de *Ferocactus pilosus* [(Galeotti ex Salm-Dyck) Werdermann], un cactus de crecimiento lento en peligro de extinción. Los tratamientos químicos para facilitar la germinación incluyeron la inmersión de las semillas en una solución de H_2O_2 al 3,34 % durante 10, 20 y 30 min, respectivamente, o en H_2O_2 al 97,3 % durante 5, 10 y 15 min. También se evaluaron los efectos de reguladores del crecimiento vegetal como el AG₃, el AIA y el ácido naftalenacético ANA. Se observó que el tratamiento más propicio fue el H_2O_2 , con una germinación del 82 % y un tiempo de respuesta de aproximadamente 6 a 10 días después de la siembra *in vitro*.

Una de las ventajas que presentan las semillas de muchos cactus es su capacidad para acelerar el proceso de germinación, lo cual es crucial dado el breve periodo durante el cual el suelo superficial retiene humedad. Tanto el tiempo como el porcentaje de germinación muestran un comportamiento similar al observado cuando se utilizan tratamientos con H_2O_2 , aplicaciones continuas de agua, o hidratación intermitente (Contreras-Quiroz et al., 2016). En condiciones naturales, las semillas de biznaga requieren de un agente dispersor que facilite

el ablandamiento de la testa, como los jugos gástricos de animales, y así puedan aprovechar eficientemente la limitada cantidad de agua pluvial retenida en las partículas del suelo para germinar (Loustalot et al., 2014; Sánchez-Villegas y Rascón-Chu, 2017).

Ferocactus histrix y *F. latispinus*, se trataron para su germinación con diversas concentraciones (125, 250 y 500 ppm) de AIA, ANA y AG₃, mientras que un grupo control se sembró únicamente con agua destilada. Los mayores porcentajes de germinación (55-75%) en ambas especies de *Ferocactus* se obtuvieron en el tratamiento control, seguido del tratamiento con 125 ppm de AIA que promovió un 51% la germinación en *F. latispinus* al noveno día, mientras que 250 ppm de ANA favorecieron un 62% de germinación en *F. histrix* al sexto día. En contraste, las concentraciones de 125 y 250 ppm de AG₃ resultaron en los niveles más bajos de germinación (<40%) en ambas especies (Amador-Alferez et al., 2013).

El cultivo *in vitro* representa una excelente herramienta biotecnológica para la conservación y propagación del cactus barril, especialmente debido a las amenazas que enfrenta en su hábitat natural, desde la pérdida de territorio, el contrabando ilegal hasta las bajas tasas de germinación. Esta técnica permite optimizar la germinación de las semillas, superar la latencia y obtener plántulas vigorosas en condiciones controladas, facilitando así la multiplicación masiva de individuos con potencial ornamental y ecológico. Además, protege a las especies en peligro de extinción al reducir la presión sobre las poblaciones silvestres y facilitar su reintroducción en ecosistemas naturales.



Literatura citada



- Amador-Alfárez KA, Díaz-González J, Loza-Cornejo S, Bivián-Castro EY. 2013. Efecto de diferentes reguladores de crecimiento vegetal sobre la germinación de semillas y desarrollo de plántulas de dos especies de *Ferocactus* (Cactaceae). *Polibotánica*, 35: 109-131. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-27682013000100007
- Anderson, E.F. 2001. The cactus family. Timber Press Inc. Portland, Oregon, United States of America, 776 pp.
- Arellano, A., G. López, F. Chablé, A. Estrada. 2013. Effect of growth regulators on the organogenesis and multiplication of *Ortegocactus macdougallii* Alexander. *Propagation of Ornamental Plants*, 13(23): 160-167. <file:///C:/Users/Sandra%20Perez/Downloads/Arellano-Perusquiaetal2013.pdf>
- Arias S., S. Gama-López, L. U. Guzmán-Cruz y B. Vázquez-Benítez. 2012. Flora del Valle de Tehuacán-Cuicatlán. Fascículo 95. Cactaceae. Instituto de Biología, UNAM. México, D. F., México. 240 pp.
- Axelrod, D. 1979. Age and origin of Sonoran Desert Vegetation. *California Academy of Sciences*, 132: 1-74.
- Bauk, K., J. Flores, C. Ferrero, R. Pérez-Sánchez, L. Las Peñas, y D. Gurvich. 2016. Germination characteristics of *Gymnocalycium monvillei* (Cactaceae) along its entire altitudinal range. *Botany*, 95: 419-428. <https://doi.org/10.1139/cjb-2016-0154>
- Berggren, W. A. y D. R. Prothero. 1992. In Eocene-Oligocene Climatic and Biotic Evolution, Eds Prothero D. R., Berggren W. A. Princeton Univ. Press, Princeton. pp:1-28.
- Bihari, Ch., A. Kumar, S. Ahamad, M. Kumar, A. M. Rahman, K. Alam, Sh. Singh, P. Gautam, S. Singh, V. Pandey. 2022. *In vitro* culture methods and molecular approaches for crop improvement in solanaceous and cucurbitaceous vegetables. *The Pharma Innovation Journal*, 11 (12): 287-293. <file:///C:/Users/Sandra%20Perez/Downloads/11-12-32-219.pdf>
- Choreño-Tapia, J.M., H. González-Rosas, T. Terrazas-Salgado, A. Hernández-Livera, 2002. Propagación *in vitro* de *Cephalocereus senilis* Haworth Pfeiffer a partir de aréolas. *Revista Chapingo Serie Horticultura*, 8(2): 183-196. <http://dx.doi.org/10.5154/r.rchsh.2001.01.008>
- Contreras-Quiroz, M. Del R., M. M. Pando, J. Flores, E. Jurado. 2016. Effects of wetting and drying cycles on the germination of nine species of the Chihuahuan Desert. *Botanical Sciences*, 94(2):221-228. <https://doi.org/10.17129/botsci.457>
- Cortés, L., I. Domínguez, T. Lebgue, O. Viramontes, A. Melgoza, C. Pinedo y J. Camarillo. 2014. Variation in the distribution of four cacti species due to climate change in Chihuahua, Mexico. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 11(1):390-402. <https://doi.org/10.3390/ijerph110100390>
- Cota-Sánchez, J. H. 2008. Evolución de cactáceas en la región del Golfo de California. En: Estudios de las Islas del Golfo de California. L. M. Flores-Campaña (ed.). Universidad Autónoma de Sinaloa, Gobierno del Estado de Sinaloa-Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, México. pp:67-79.
- Faucon, M.P., D. Houben y H. Lambers. 2017. Plant functional traits: Soil and ecosystem services. *Trends in Plant Science*, 22(5):385-394. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2017.01.005>
- Ferl, R. y A. L. Paul. 2000. Genome Organization and Expression. Pp. 312-357. En: Buchanan, B., W. Gruissem & R. Jones (Eds.). *Biochemistry and Molecular Biology of Plants*. American Society of Plant Physiologists, USA, 1280 pp.
- García-González, D.A., P. Osuna-Ávila, M.S. Santos-Díaz, y J.P. Flores-Marquez. 2022. Initial seed weight and scarification affect *in vitro* germination of *Echinocactus parryi* (Engelm.). *Agrociencia*, 2022:1-9. <https://doi.org/10.47163/agrociencia.v56i5.2484>
- Guzmán, U., S. Arias y P. Dávila. 2007. Catálogo de Cactáceas Mexicanas. Universidad Nacional Autónoma de México y Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. México, D.F, 315 pp.
- Guzmán, U., S. Arias, P. Dávila. 2003. Catálogo de cactáceas mexicanas. UNAM, CONABIO, México DF, 315 pp.
- Hunt, D.R., N.P. Taylor y G. Charles. 2006. New cactus lexicon. International Cactaceae Systematics Group dh books. Suiza. Volumes I.
- Jiménez-Sierra, C. L. 2011. Las cactáceas mexicanas y los riesgos que enfrentan. *Revista Digital Universitaria*, 12:3-22.
- Koi, W.S.W., J. Sundarasekar, K. Sathasivam, y S. Subramaniam. 2016. Effects of plant growth regulators on seed germination and callus induction of *Hylocereus costaricensis*. *Pakistan Journal of Botany*, 48: 977-982. [https://www.pakbs.org/pjbot/PDFs/48\(3\)/16.pdf](https://www.pakbs.org/pjbot/PDFs/48(3)/16.pdf)
- Lackie, J. M. y J.A.T. Dow. 1989. The dictionary of cell biology. Ed. Academic Press, USA, 388 pp.
- Loustalot, L. E., B. G. X. Malda, A. H. Suzán, S. L.G. Hernández, E. A. Guevara. 2014. Estudio de germinación y crecimiento en semillas de *Ferocactus histrix* (De Candolle). *Revista Cactáceas y Suculentas Mexicanas*, 59(3):79-95. <https://biblat.unam.mx/hevila/Cactaceasy-suculentasmexicanas/2014/vol59/no3/2.pdf>
- McIntosh, M.E. 2002. Plant size, breeding system, and limits to reproductive success in two sister species of *Ferocactus* (Cactaceae). *Plant Ecology*, 162, 273-288. <https://doi.org/10.1023/A:1020329718917>
- Murashige, T. 1974. Plant propagation through tissue cultures. *Annual Review of Plant Physiology*, 25: 135-166. <http://dx.doi.org/10.1146/annurev.pp.25.060174.001031>
- Murashige, T. y F. Skoog. 1962. A revised medium for rapid growth and bio assays with tobacco tissue cultures. *Plant Physiology*, 15:473-497. <https://doi.org/10.1111/j.1399-3054.1962.tb08052.x>
- Nobel, S. P. 1998. Los incomparables Agaves y Cactus. Ed. Trillas, México D. F. 211 pp.
- Rodríguez, G.H.A., T.J.F. García, C.R. Guzmán, y P.A.A. Feregrino. 2019. Efecto del método de escarificación sobre el porcentaje de germinación en semillas (*Erythrina americana* Miller). *Revista Perspectivas de la Ciencia y la Ingeniería*, 2: 12-21. <https://revistas.uaq.mx/index.php/perspectivas/article/view/188/192>
- Rodríguez, L., M. Daquinta, E. Hernández, R. Ardeból, J. Vásquez. 2013. Propagación *in vitro* de *Escobaria cubensis* (britton & rose) Hunts. *Ciencia y sociedad*, 38(2): 345-375.
- Rodríguez-Ruiz, E. R., W.A. Poot-Poot, J.A. Rangel-Lucio, H. Vaquera-Huerta, O.J. González-Gaona, J. Treviño-Carreón. 2018. Germinación *in vitro* de biznaga cabuchera. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 9(3): 691-699.
- Sánchez-Villegas, A., C. A. Rascón. 2017. Efecto de la escarificación química y del ácido giberélico en la germinación de *Mammillaria mainiae*. *Revista Cactáceas y Suculentas Mexicanas*, 62(1):4-12.
- Scheinvar, E., L. Eguiarte, C. Jiménez, M. Matias, M. Rocha, K. Arzate, R. Salazar, J. Pineda, M. Olson, N. Abreu, L. Trejo, A. González, N. Tamariz y R. Chauvet. 2008. Agaves y cactáceas de Metztitlán: Ecología, evolución y conservación. Instituto Nacional de Ecología, México, 78 pp. file:///C:/Users/Sandra%20Perez/Downloads/ScheinvarEguiarte_AgavesYcactaceasDeMetztitlan.pdf
- Villavicencio-Gutiérrez, E.E., G. Arellano-Ostoa, A. Cano-Pineda, J. C. Ríos-Saucedo. 2023. Multiplicación *in vitro* del barril de oro (*Echinocactus grusonii* Hildm.) (FAM.: CACTACEAE). *Journal of Environmental and Agroecological Sciences*, 5: 38-42.

INTERACCIONES POSITIVAS ENTRE UN ÁRBOL INVASOR, EL PIRUL, Y LA AVIFAUNA DE MÉXICO

/// JORGE E. RAMÍREZ-ALBORES¹*, FRANCISCO A.
GUERRA-COSS² Y ERNESTO I. BADANO²

¹Departamento de Botánica, Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Saltillo, Coahuila, México.

²IPICYT/DCA, División de Ciencias Ambientales, Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica. San Luis Potosí, SLP, México.

*Autor para correspondencia: jorgeramirez22@hotmail.com





Palabras clave: biodiversidad, conservación, dispersión, exótica invasora, interacción ecológica, mutualismo, *Schinus molle*.

Key words: biodiversity, conservation, dispersal, invasive exotic, ecological interaction, mutualism, *Schinus molle*.

RESUMEN

Las especies exóticas pueden convertirse en invasoras cuando se propagan sin intervención humana y afectan negativamente a la biodiversidad. Este es el caso del pirul (*Schinus molle*), un árbol sudamericano que fue introducido en México hace casi cinco siglos e invadió áreas degradadas del centro del país, donde interfiere con la recuperación de la vegetación nativa. Sin embargo, esta especie invasora pudiera beneficiar a la fauna local y, para establecer si esto es posible, nos enfocamos en las interacciones entre pirules y aves. Las interacciones entre pirules y aves se registraron entre 2012 y 2024 realizando observaciones directas sobre árboles establecidos en distintas regiones de México. Se registró un total de 150 especies de aves, 143 nativas y siete exóticas, que interactúan con el pirul. Estas interacciones benefician a las aves, lo que representa un dilema para la biología de la conservación porque, mientras el pirul ayuda a mantener la avifauna en áreas degradadas, también amenaza la biodiversidad vegetal. Por lo tanto, la gestión y control de esta invasión biológica debe equilibrar su valor ecológico con los riesgos ambientales que representa.

ABSTRACT

Exotic species can become invasive when they spread without human intervention and negatively affect biodiversity. This is the case of the pirul (*Schinus molle*), a South American tree that was introduced to Mexico almost five centuries ago and invaded degraded areas in the central section of the country, where it interferes with the recovery of native vegetation. However, this invasive species could benefit local fauna, and to determine whether this is possible, we focused on interactions between these trees and birds. The interactions between the pirul and birds were recorded between 2012 and 2024 performing direct observations on trees established in different regions of Mexico. A total of 150 bird species, 143 native and seven exotic, were recorded interacting with the pirul. These interactions benefit birds, and this implies a dilemma for conservation biology because, while the pirul contributes to maintain the avifauna in degraded areas, it also threatens plant biodiversity. Therefore, the management and control of this biological invasion should balance its ecological value with the environmental risks it represents.

UNA BREVE INTRODUCCIÓN A LAS INVASIONES BIOLÓGICAS

Dependiendo de su origen, los animales y las plantas que forman parte de nuestro entorno se clasifican en especies “nativas” y “exóticas”. Las especies nativas son aquellas que se originaron mediante procesos evolutivos en una región biogeográfica. En este sentido, México es un país megadiverso debido a la gran cantidad de especies nativas que alberga, muchas de las cuales son endémicas debido a que sólo están presentes en nuestro país. Las especies exóticas, por otra parte, son aquellas que los seres humanos hemos trasladado desde sus regiones de origen hacia áreas donde nunca habían estado presentes. A diferencia de las especies nativas, la mayoría de las especies exóticas requieren cuidados humanos para sobrevivir y reproducirse, como ocurre con gran parte de los animales albergados en zoológicos y las plantas ornamentales de parques y jardines. Por estos motivos, la mayoría de las especies exóticas permanecen en los sitios donde fueron introducidas, pero algunas de ellas logran sobrevivir,

reproducirse y dispersarse hacia nuevos sitios sin intervención humana, convertirse así en “especies invasoras” que pueden afectar la biodiversidad nativa o nuestras actividades económicas (Richardson et al., 2000; IUCN, 2025).

Los gatos domésticos (*Felis silvestris catus*) permiten ejemplificar como ocurren esas “invasiones biológicas”, que es como comúnmente se denomina a los procesos mediante los cuales una especie exótica se convierte en invasora. Estos animales son originarios de África, donde fueron domesticados hace unos 8000 años, pero desde entonces los hemos movilizad hacia el resto del mundo para controlar plagas de roedores o como animales de compañía. Así, en un principio, los gatos domésticos fueron especies exóticas que solamente residían en nuestro entorno, pero al ser depredadores empezaron a alimentarse de aves, reptiles y mamíferos de esas zonas. Esto les permitió sobrevivir y reproducirse sin asistencia humana, convirtiéndose en una especie invasora que se propagó a través de los ecosistemas de las nuevas regiones. El principal problema detrás de esta invasión biológica es que llevó al borde de la extinción a muchos

animales nativos que los gatos domésticos empleaban como alimento, reduciendo la biodiversidad faunística de las regiones afectadas (Loss et al., 2013).

En el caso de las plantas, una invasión biológica con la que estamos muy familiarizados es la del diente de león (*Taraxacum officinale*). Esta especie es originaria de Europa y Asia, pero sus semillas arribaron a nuestro continente hace unos 400 años atrás, mezcladas con granos de trigo para cultivo. Al encontrar condiciones ambientales favorables para su germinación y crecimiento en los sistemas agrícolas de América, el diente de león se estableció inicialmente como una especie exótica en esos sitios. Posteriormente, debido a que sus semillas son fácilmente dispersadas por el viento, desde allí se propagó hacia los ecosistemas circundantes. Hoy en día, el diente de león constituye una amenaza porque compite con muchas las plantas nativas por los recursos del suelo (Lee et al., 2021), a la vez que interfiere con el desarrollo algunos cultivos y causa importantes pérdidas económicas (Franssen y Kells, 2007).

Además de los dos ejemplos anteriores, en México existen más de 2660 especies exóticas (Ramírez-Albores y Badano, 2021), de las cuales casi 680 son invasoras (CONABIO, 2023). Esos datos permiten ilustrar que no todas las especies exóticas llegan a ser invasoras, donde la principal diferencia entre esos dos términos radica en el nivel de intervención humana que requiere una especie para sobrevivir. Como explicamos anteriormente, los humanos introducimos muchas especies en regiones que no pueden alcanzar por sus propios medios, donde esas introducciones pueden ser intencionales (como el caso de los gatos domésticos) o accidentales (como el caso del diente de león). Esas especies nunca dejarán de ser exóticas si requieren cuidados constantes para sobrevivir (por ejemplo, para riego, alimentación o protección) y, por lo tanto, su distribución estará confinada a sitios donde se provean esos cuidados. Para que una especie exótica se convierta en invasora, esas regiones deben ofrecerle los recursos y las condiciones ambientales que necesita para sobrevivir, reproducirse y propagarse de manera autónoma. De esta manera, la intervención humana en las invasiones biológicas se limita a movilizar a las especies, mientras que el resto del proceso depende de cuánto coincidan las características del ambiente con los requerimientos que tiene la especie exótica desarrollar su ciclo de vida (Richardson et al., 2000).

UN ÁRBOL INVASOR CON MUCHOS SIGNIFICADOS

Muchos árboles exóticos han sido introducidos en México con fines ornamentales, agrícolas o de reforestación. Aunque la mayoría requiere cuidados

para sobrevivir, algunas especies han logrado invadir algunos ecosistemas de nuestro país. Este es el caso del pirul o pirú (*Schinus molle*), un árbol originario de la región Andina de Sudamérica (Perú y Bolivia, en específico) que fue introducido en México a mediados del siglo XVI por el primer virrey de Nueva España, Antonio de Mendoza y Pacheco (Ramírez-Albores y Badano, 2013; Ramírez-Albores et al., 2015). Debido a su amplio uso como árbol ornamental, también ha sido introducido en regiones con climas mediterráneos, subtropicales y templados de Norteamérica, África, Asia, Oceanía y el sur de Europa, donde puede comportarse como especie invasora (Iponga et al., 2009; Ramírez-Albores et al., 2015, 2021).

En nuestro país, el pirul fue originalmente cultivado como fuente de recursos maderables en los alrededores de la Ciudad de México (CONAFOR, 2014). Sin embargo, estar adaptado a climas secos y suelos pobres en nutrientes, desde allí se dispersó hacia los ecosistemas circundantes e invadió zonas áridas y semiáridas del Altiplano Central, especialmente aquellas donde la vegetación nativa había sido removida para desarrollar actividades agrícolas o ganaderas (Ramírez-Albores y Badano, 2013; Ramírez-Albores et al., 2015; Guerra-Coss et al., 2021). Con el paso del tiempo, esta invasión biológica avanzó hasta alcanzar su "equilibrio biogeográfico", lo que significa que el pirul ha invadido todos los sitios de México que ofrecen condiciones y recursos favorables para su establecimiento (Ramírez-Albores et al., 2020).

Aunque el pirul alcanzó el equilibrio biogeográfico en México (Ramírez-Albores et al., 2020), es muy común encontrarlo en áreas que son aptas para su desarrollo, especialmente dentro de asentamientos humanos (Figura 1). Esto se debe a que este árbol fue ampliamente incorporado a nuestra cultura. Por ejemplo, muchas comunidades rurales emplean su madera para confeccionar herramientas y objetos artesanales, mientras que sus hojas y frutos son muy apreciados en la medicina tradicional porque contienen compuestos con propiedades antisépticas y analgésicas (Ramírez-Albores y Badano, 2013). Dentro de las ciudades, este árbol destaca por su rápido crecimiento, ofreciendo sombra y contribuyendo a reducir la contaminación del aire (Villavicencio-Nieto y Pérez-Escandón, 2010). Además, debido a que se le atribuyen propiedades espirituales, sus hojas se utilizan en rituales para eliminar las energías negativas (Martínez-González et al., 2023). Así, aunque el pirul es una especie invasora que persiste por sus propios medios en el Altiplano Central de México, la cultura popular fomenta su presencia en otras regiones del país, donde continúa siendo una especie exótica que requiere asistencia humana para sobrevivir.



Figura 1. Imágenes de pirules establecidos en áreas urbanas y rurales de México. Créditos de las fotografías: J.E. Ramírez-Albores.

Más allá de su relevancia cultural, un aspecto poco investigado del pirul son las interacciones que entabla con otras especies en México. Los escasos estudios al respecto indican que las hojas y frutos de este árbol liberan sustancias tóxicas que inhiben la germinación y el crecimiento de plantas nativas en su entorno, lo que dificulta la recuperación de la vegetación original en las zonas que ha invadido (Avendaño-González et al., 2016; Guerra-Coss et al., 2021). Sin embargo, también se ha documentado que el pirul entabla relaciones positivas con muchas especies de aves, donde se benefician tanto los animales como la especie invasora (Corkidi et al., 1991; Alfaro-Reyna et al., 2023). Debido a que existe poca información sobre estas interacciones positivas, en las siguientes secciones analizaremos sus consecuencias, tanto para el pirul como para las aves.

INTERACCIONES ECOLÓGICAS POSITIVAS ENTRE EL PIRUL Y LAS AVES

Las interacciones ecológicas positivas entre especies pueden ser mutualistas o comensalistas. Los mutualismos ocurren cuando todas las especies participantes se benefician, mientras que en los comensalismos una especie se beneficia sin causar daño a la otra. La existencia de este tipo de interacciones entre aves y un árbol invasor puede generar dilemas éticos en materia de conservación biológica. Este dilema se debe a que las acciones de conservación deben proteger solamente a las especies nativas, promoviendo el control o erradicación de las especies invasoras. Sin embargo, algunas plantas invasoras pueden estar supliendo algunas funciones ecológicas que las plantas nativas ya no cumplen porque las actividades humanas las removieron de los ecosistemas (Rai y Singh, 2020). Por lo tanto, podemos preguntarnos hasta qué punto esas invasiones biológicas son perjudiciales.

Para contestar la pregunta anterior, analizamos las interacciones entre pirules y aves realizando observaciones directas sobre árboles establecidos en el campo en diferentes regiones de México. Estas observaciones se llevaron a cabo entre 2012 y 2024, contabilizando un total 7632 horas de observación a lo largo de 1224 días, en puntos de conteo ubicados en campos agrícolas, áreas verdes urbanas y alrededores de cuerpos de agua donde estuviera presente este árbol. En cada sitio, registramos las actividades que las aves desarrollaban en los pirules, que se clasificaron en: (1) perchado, cuando las aves se posan en las ramas para descansar entre vuelos o protegerse de depredadores; (2) alimentación directa, cuando las aves consumen los frutos del pirul; (3) alimentación secundaria, cuando las aves buscan otra fuente de alimento en el árbol, principalmente insectos; (4) dormidero, cuando las aves utilizan al árbol como sitio para dormir durante la noche; (5) nidificación, cuando las aves utilizan el árbol para construir sus nidos; y (6) fuente de materiales, cuando las aves utilizan ramas y hojas caídas como materiales para construir sus nidos, sea en el mismo pirul u otros sitios.

Con nuestras observaciones detectamos un total de 150 especies de aves que establecieron algún tipo de relación con el pirul (Figuras 2 y 3), de las cuales 143 especies son nativas de México y otras siete son exóticas. Al menos 27 especies fueron detectadas consumiendo frutos de este árbol. Las especies nativas más destacadas con las cuales el pirul entabló este tipo de relaciones fueron la paloma de ala blanca (*Zenaida asiatica*), la paloma huilota (*Zenaida macroura*), el zanate mayor (*Quiscalus mexicanus*), el mirlo primavera (*Turdus migratorius*), el mirlo dorso canela (*Turdus rufopalliatu*s), el mirlo café (*Turdus grayi*), el chinito (*Bombycilla cedrorum*) y el pinzón mexicano (*Haemorhous mexicanus*). A estas especies se sumaron algunas especies exóticas, como el gorrión doméstico (*Passer domesticus*) y la paloma doméstica (*Columba livia*). Este consumo de frutos pudiera estar contribuyendo a la propagación del pirul, ya que las aves suelen digerir solamente la pulpa de los frutos, mientras que expulsan las semillas junto con

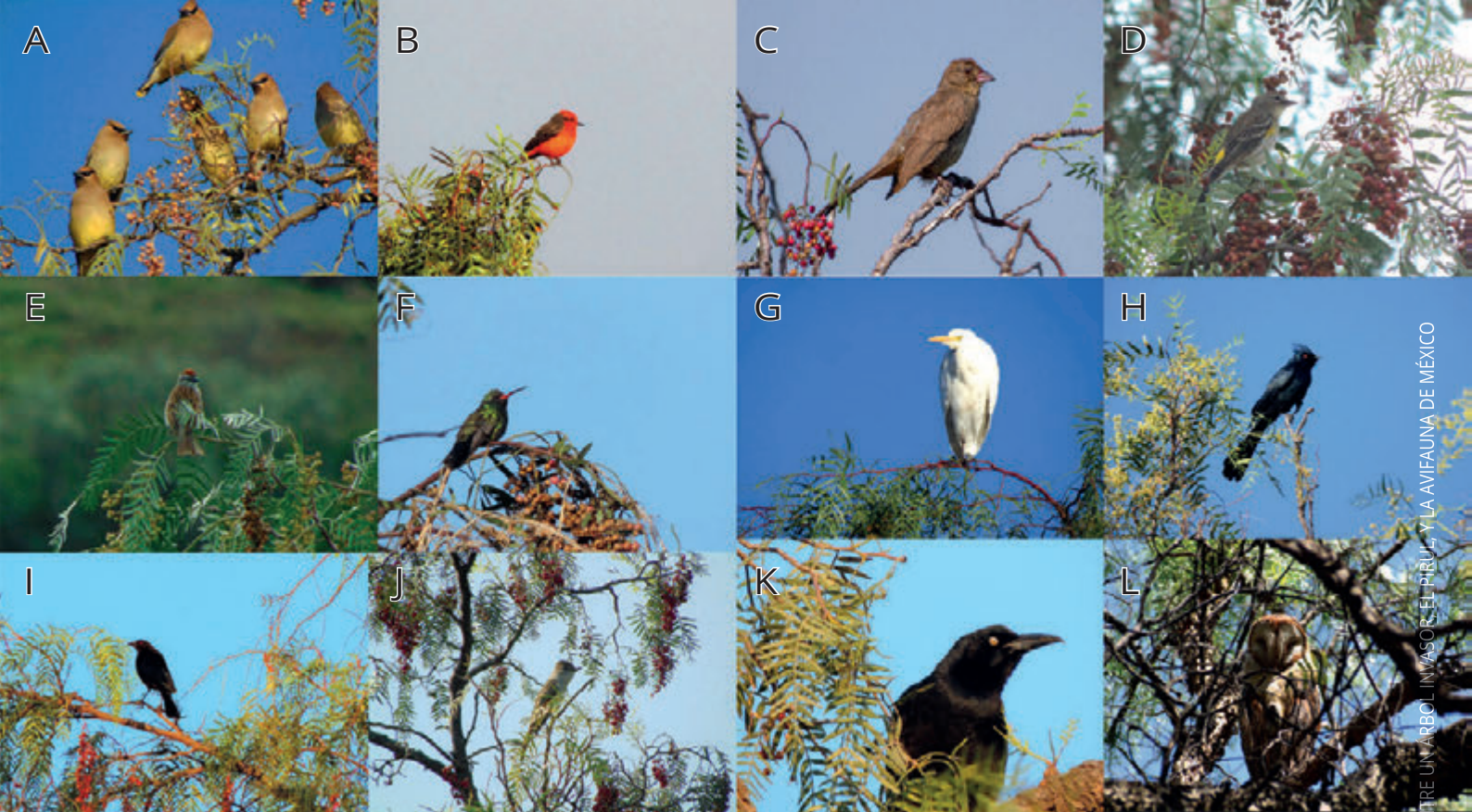


Figura 2. Algunas especies de aves que interactúan con el pirul: A) *Bombycilla cedrorum*, B) *Pyrocephalus rubinus*, C) *Melozone fusca*, D) *Setophaga coronata*, E) *Spizella passerina*, F) *Cynanthus latirostris*, G) *Ardea ibis*, H) *Phainopepla nitens*, I) *Molothrus aeneus*, J) *Myiarchus cinerascens*, K) *Quiscalus mexicanus*, y M) *Tyto furcata*. Créditos de las fotografías: J.E. Ramírez-Albores.

sus heces y, así, las dispersan hacia nuevos ambientes. Estas interacciones mutualistas, donde las aves reciben una recompensa alimenticia de los pirules y a cambio dispersan sus semillas, han sido reportadas previamente para el chinito (*B. cedrorum*) en los alrededores de la Ciudad de México (Corkidi et al., 1991), como también para el zanate mayor (*Q. mexicanus*) y el centzontle norteño (*Mimus polyglottos*) en la región centro-norte de país (Alfaro-Reyna et al., 2023). Nuestros hallazgos contribuyen a ampliar la lista de especies de aves con las cuales el pirul pudiera establecer esas interacciones positivas, a la vez que permiten sugerir que estas aves pudieran haber sido los principales responsables de la expansión de esta especie invasora en México.

Pese a la importancia de las interacciones mutualistas descritas anteriormente, la mayoría de las relaciones que las aves establecen con los pirules son comensalismos. Esto se evidencia en que 148 especies utilizaron estos árboles para perchar, donde destacan por su relevancia ecológica la lechuza de campanario (*Tyto furcata*; Figura 2) y el colibrí de pico ancho (*Cynanthus latirostris*; Figura 2). Además, 65 especies de aves utilizaron estos árboles como sustrato para buscar insectos y otros invertebrados, que son su fuente principal de alimento (Figura 3). Este fue el caso del chipe rabadilla amarilla (*Setophaga coronata*; Figura 2), que se observa comúnmente en las ramas del pirul en busca de insectos que se esconden en su corteza. Además, el denso follaje y la estructura ramificada del pirul brindan sitios de nidificación para algunas especies, entre las que destacó la aguililla cola roja (*Buteo jamaicensis*), un ave rapaz que además lo utiliza como dormidero y fuente de materiales. Estos comensalismos que el pirul entabla con las aves son importantes porque esta especie invasora puede ser el único árbol disponible que cumple funciones de alimentación, percha, o sitios de nidificación en paisajes donde la vegetación nativa ha sido

reducida por el avance de las actividades agropecuarias o la urbanización (Figura 3).

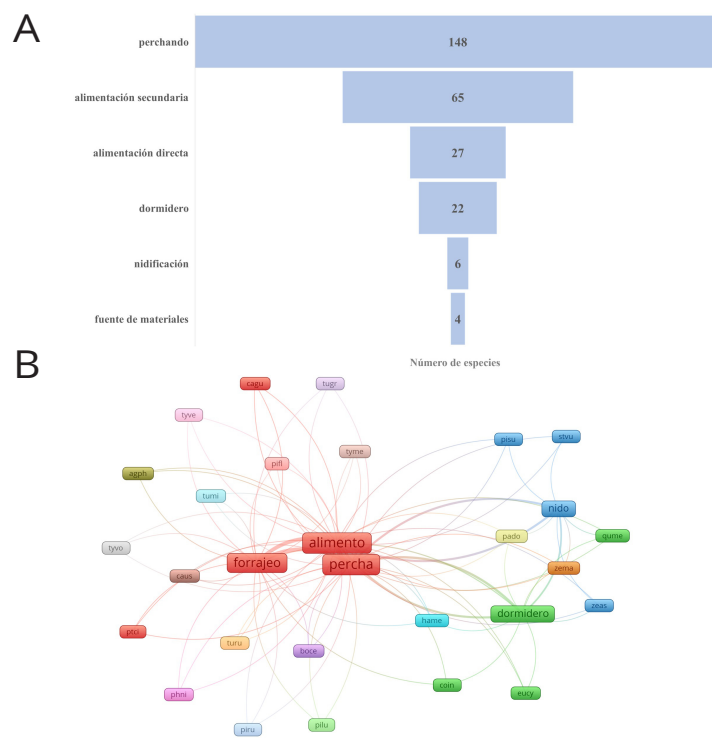


Figura 3. Número de especies de aves que entablan diferentes interacciones con el pirul (A) y red de las interacciones más frecuentemente detectadas entre aves y pirules (B). Los códigos en la red de interacciones indican el nombre de cada especie de ave – *Zenaida asiatica* (zea), *Zenaida macroura* (zema), *Passer domesticus* (pado), *Quiscalus mexicanus* (qume), *Turdus migratorius* (tumi), *Turdus rufopalliat* (turu), *Turdus grayi* (tugr), *Agelaius phoeniceus* (agph), *Bombycilla cedrorum* (boce), *Catharus guttatus* (cagu), *Catharus ustulatus* (caus), *Piranga flava* (pifl), *Piranga rubra* (piru), *Piranga ludoviciana* (pilu), *Ptiliogonys cinereus* (ptcu), *Tyrannus melancholicus* (tyme), *Tyrannus vociferans* (tyvo), *Tyrannus verticalis* (tyve), *Columbina inca* (coin), *Euphagus cyanocephalus* (eucy), *Haemorhous mexicanus* (hame), *Pitangus sulphuratus* (pisu), *Sturnus vulgaris* (stvu) y *Phainopepla nitens* (phni).

IMPPLICACIONES ECOLÓGICAS Y DE CONSERVACIÓN

A pesar de las importantes funciones ecológicas que el pirul puede estar cumpliendo en ecosistemas deteriorados por las actividades humanas, la expansión de esta invasión biológica mediada por las aves puede tener fuertes repercusiones en los ecosistemas mexicanos. Por ejemplo, una de las principales amenazas que representa el pirul para la biodiversidad es su capacidad para formar monocultivos muy densos, dentro de los cuales casi ninguna planta nativa logra establecerse (Avendaño-González et al., 2016; Ramírez-Albores et al. 2015; Guerra-Coss et al., 2021). Como resultado, muchas plantas nativas pierden su espacio ecológico y esto altera profundamente la composición de la vegetación. Además, la preferencia de algunas aves nativas por los frutos del pirul puede reducir la diversidad de su dieta, lo que repercutiría en las redes ecológicas de los ecosistemas (Figura 3). No obstante, para muchas personas el pirul representa sombra, tradición y protección espiritual. Por estos motivos, cualquier campaña de erradicación o control

de esta especie puede ser percibida como una amenaza a nuestra identidad cultural. Esto sugiere que, más allá de las interacciones ecológicas entre el pirul y la avifauna de México, las estrategias para manejar de esta invasión biológica deben considerar la percepción social que tenemos de estos árboles y realizar un balance entre sus beneficios ecosistémicos y los riesgos que representa para la biodiversidad.

AGRADECIMIENTOS

A los Fondos Institucionales de Investigación para el proyecto 38111-425104001-2389 de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. A Héctor Cayetano, Rogelio Bautista y Oswaldo Gómez por compartir algunas fotos de las aves. Al Fondo Sectorial de Investigación Ambiental SEMARNAT-CONACYT, por el desarrollo del proyecto "Modelos de distribución y protocolos experimentales para analizar el efecto del cambio climático sobre la distribución de plantas invasoras en México", con clave FSSEMARNAT01-C-2018-1-A3-S-80837.



Literatura citada



- Alfaro-Reyna, T., F. Arellano-Martín, C. Aguirre-Gutiérrez, J. Delgado-Balbuena. 2023. Dispersores de semillas y su influencia en la invasión del pirul (*Schinus molle*) en el centro-norte de México. *Abanico Agroforestal*. 5: 1-16. <https://doi.org/10.37114/abaagrof/2023.8>
- Avendaño-González, M., E. Badano, J.E. Ramírez-Albores, J. Flores, J.A. Flores-Cano. 2016. Differential allelopathy between genders of an invasive dioecious tree on desert plants. *Botanical Sciences*. 94(2): 1-10. <https://doi.org/10.17129/botsci.522>
- CONABIO (Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad). 2023. Información sobre especies invasoras en el Sistema nacional sobre Biodiversidad. CONABIO, México. <https://www.biodiversidad.gob.mx/especies/invasoras>
- CONAFOR (Comisión Nacional Forestal). 2014. *Schinus molle* L. SIRE (Sistema de Especies Forestales): CONAFOR, CONABIO-PRONARE. <http://www.conafor.gob.mx:8080/documentos/docs/13/1000Schinus%20molle.pdf>
- Corkidi, L., S. Cacho, A. Búrquez. 1991. Dispersión del pirú (*Schinus molle* L., Anacardiaceae) por aves en Teotihuacán, México. *Acta Botánica Mexicana*. (15): 17-22.
- Franssen, A. S., J.J. Kells. 2007. Control strategies for common dandelion (*Taraxacum officinale*) in no-tillage cropping systems. *Weed Technology*. 21:18-22. 2007. <http://dx.doi.org/10.1614/WT-04-212.1>
- Guerra-Coss, F., E. Badano, I.E. Cedillo-Rodríguez, J.E. Ramírez-Albores, J. Flores, F. Barragán-Torres, J.A. Flores-Cano. 2021. Modelling and validation of the spatial distribution of suitable habitats for the recruitment of invasive plants on climate change scenarios: an approach from the regeneration niche. *Science of the Total Environment*. 777: 146007. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146007>
- Iponga, D.M., S.J. Milton, D.M. Richardson. 2009. Reproductive potential and seedling establishment of the invasive alien tree *Schinus molle* (Anacardiaceae) in South Africa. *Austral Ecology*. 34: 678-687. <https://doi.org/10.1111/j.1442-9993.2009.01975.x>
- IUCN (International Union for Conservation Nature and Natural Resources). 2025. Invasive alien species and climate change. IUCN. Gland, Switzeland. <https://iucn.org/resources/issues-brief/invasive-alien-species-and-climate-change>
- Lee, S., S. Woo, E. Kim. 2021. Differential effect of inter- and intraspecific competition on the performance of invasive and native *Taraxacum* species. *Plant Species Biology*. 36(2): 187-197. <https://doi.org/10.1111/1442-1984.12301>
- Loss, S.R., T. Will, P.P. Marra. 2013. The impact of free-ranging domestic cats on wildlife of the United States. *Nature Communications*, 4: 1396. <https://doi.org/10.1038/ncomms2380>
- Martínez-González, R.E., F.M. Huerta-Martínez, C. Neri-Luna, L. Barrientos-Ramírez. 2023. Etnobotánica de los barrios antiguos de Guadalajara, Jalisco, México: el uso de plantas medicinales. *Boletín Latinoamericano y del Caribe de Plantas Medicinales y Aromáticas*. 23: 75-110. <https://doi.org/10.37360/blacpma.24.23.1.6>
- Rai, P.K., J.S. Singh. 2020. Invasive alien plant species: their impact on environment, ecosystem services and human health. *Ecological Indicators*. 111:106020. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.106020>
- Ramírez-Albores, J.E., E. Badano. 2013. Perspectiva histórica, sociocultural y ecológica de una invasión biológica: el caso del pirul (*Schinus molle* L., Anacardiaceae) en México. *Boletín de la Red Latinoamericana para el Estudio de Especies Invasoras*. 3(1): 4-15.
- Ramírez-Albores, J.E., E. Badano. 2021. Alien species as counterpart of a megadiverse country as Mexico. *Management of Biological Invasions*. 12(4): 828-845. <https://doi.org/10.3391/mbi.2021.12.4.04>
- Ramírez-Albores, J.E., M. Avendaño-González, E. Badano. 2015. El pirul, el árbol que vino del sur. *CONABIO. Biodiversitas*. 118:6-11.
- Ramírez-Albores, J.E., G. Bizama, R.O. Bustamante, E.I. Badano. 2020. Niche conservatism in a plant with long invasion history: the case of the Peruvian peppertree (*Schinus molle*, Anacardiaceae) in Mexico. *Plant Ecology and Evolution*. 153: 3-11. <https://doi.org/10.5091/plecevo.2020.1562>
- Ramírez-Albores, J.E., D.M. Richardson, V.M. Stefenon, G. Bizama, M. Pérez-Suárez, E. Badano. 2021. A global assessment of the potential distribution of naturalized and planted populations of the ornamental alien tree *Schinus molle*. *NeoBiota*. 68: 105-126. <https://doi.org/10.3897/neobiota.68.68572>
- Richardson, D.M., N. Allsopp, C.M. D'Antonio, S.J. Milton, M. Rejmanek. 2000 Plant invasions the role of mutualisms. *Biological Reviews*. 75: 65-93. <https://doi.org/10.1017/S0006323199005435>
- Villavicencio-Nieto, M.A., B.E. Pérez-Escandón. 2010. Plantas tradicionalmente usadas como plaguicidas en el estado de Hidalgo, México. *Polibotánica*. 30: 193-238.

DEL CAMPO AL PLATO:

¿SON SEGUROS LOS ALIMENTOS QUE CONSUMIMOS?

UN ANÁLISIS DE LOS LÍMITES MÁXIMOS DE RESIDUOS Y SU IMPORTANCIA CIENTÍFICA

VICTOR MANUEL ALMARAZ-VALLE¹, JOSÉ MANUEL VÁZQUEZ-NAVARRO² y J. CONCEPCIÓN RODRÍGUEZ-MACIEL^{1*}



¹Posgrado en Fitosanidad – Entomología y Acarología, Colegio de Postgraduados, Texcoco, Estado de México, México. C. P. 56230

²Facultad de Agricultura y Zootecnia, Universidad Juárez del Estado de Durango, Ej. Venecia, C.P. 35111, Municipio de Gómez Palacio, Durango, México.
Autor de correspondencia: concho@colpos.mx

RESUMEN

Los Límites Máximos de Residuos (LMR) de plaguicidas y medicamentos veterinarios en alimentos son una herramienta fundamental para proteger la salud pública, facilitar el comercio internacional y garantizar la calidad de los productos. Sin embargo, numerosos estudios evidencian que en México y otros países latinoamericanos existen frutas y verduras que superan estos límites, lo que representa riesgos serios para la salud, especialmente en los grupos vulnerables. Es imprescindible fortalecer los sistemas de monitoreo, exigir certificados de sanidad y modernizar la infraestructura de análisis para asegurar alimentos saludables y sostenibles.

ABSTRACT

Maximum Residue Limits (MRLs) for pesticides and veterinary drugs in food are essential tools for protecting public health, facilitating international trade, and ensuring product quality. However, scientific studies reveal that in Mexico and other Latin American countries, fruits and vegetables often exceed these limits, posing serious health risks, mainly to vulnerable populations. It is crucial to strengthen monitoring systems, require health certificates, and modernize analytical infrastructure to ensure safe and sustainable food.



Palabras clave: intoxicación por alimentos, salud alimentaria, residuos de agroquímicos.

Keywords: food poisoning, food safety, pesticide residues.

INTRODUCCIÓN

¿Alguna vez te has preguntado qué tan seguros son los alimentos que llegan a tu mesa? Bajo la superficie de cada fruta y verdura que consumes, existe una historia compleja de regulación, ciencia y vigilancia. Los Límites Máximos de Residuos (LMR) de plaguicidas y medicamentos veterinarios constituyen una barrera invisible pero fundamental entre la salud pública y los riesgos potenciales derivados de la agricultura moderna. Estos límites, definidos por organismos como la FAO, la OMS y el Codex Alimentarius, establecen las cantidades máximas permitidas de residuos en alimentos, siempre con el objetivo de proteger al consumidor.

¿QUÉ SON LOS LMR Y CÓMO SE DEFINEN?

Los LMR se determinan a partir de rigurosos estudios científicos: ensayos de campo, análisis toxicológicos, curvas de disipación de residuos y evaluaciones dietarias de la población. De acuerdo con la FAO/WHO (2024), estos límites no solo consideran la toxicidad aguda y crónica de los compuestos, sino también el consumo habitual de los alimentos dentro de una dieta típica. Su establecimiento es el resultado de colaboraciones internacionales y se actualiza constantemente a medida que la evidencia científica avanza y se identifican nuevos riesgos.

IMPORTANCIA INTERNACIONAL DE LOS LMR

Los LMR son clave para la confianza en los mercados globales. Un producto agrícola que excede los LMR puede ser rechazado y destruido en el país de destino, generando pérdidas económicas, daños reputacionales y sanciones para el productor (Handford et al., 2015). Además, estos límites favorecen la armonización de regulaciones y permiten que los consumidores, sin importar su país de origen, tengan acceso a alimentos seguros y certificados.

EVIDENCIA CIENTÍFICA SOBRE EL INCUMPLIMIENTO DE LOS LMR

Diversos estudios han documentado que la realidad dista del ideal regulatorio. En Veracruz, México, el 14.8% de las muestras analizadas contenían residuos por encima de los valores permitidos, incluyendo plaguicidas prohibidos como el clorpirifós (Díaz-Vallejo et al., 2021). En Nuevo León, se hallaron naranjas con residuos que superaban los límites establecidos por la Unión Europea (Suárez-Jacobo et al., 2017). En Perú, la situación es aún más alarmante: Romero (2023) reporta la presencia de 37 agroquímicos peligrosos en frutas y verduras, algunos de ellos hasta 249 veces por encima de los LMR aceptados, con cuatro intoxicaciones diarias en promedio, principalmente no detectadas en el momento de la exposición.

Figura 1. Venta de vegetales en el mercado local





Figura 2. Almacenamiento de envases vacíos de plaguicidas tóxicos y altamente tóxicos en campos agrícolas.

CONSECUENCIAS PARA LA SALUD Y LA ECONOMÍA

Las implicaciones para la salud humana están bien documentadas en la literatura científica. La exposición a residuos de plaguicidas, como el clorpirifós y el metomilo, se asocia con alteraciones neurológicas, daños hepáticos y renales, así como riesgos de cáncer y enfermedades endocrinas, sobre todo en niños, personas inmunocomprometidas y mujeres embarazadas (Zikankuba et al., 2019; Díaz-Vallejo et al., 2021). Económicamente, el rechazo de productos en mercados internacionales representa pérdidas millonarias y obstaculiza el crecimiento del sector agrícola nacional (Salas et al., 2003).

PROPUESTAS BASADAS EN EVIDENCIA CIENTÍFICA

Frente a este panorama, la literatura coincide en la necesidad de reforzar la vigilancia en mercados locales, exigir certificados de sanidad vegetal y actualizar los laboratorios de análisis de residuos (FAO/WHO, 2024; EFSA, 2021). La adopción de sistemas de monitoreo automatizados y la capacitación de personal técnico son

estrategias recomendadas para alcanzar estándares internacionales. Además, la actualización periódica de los catálogos de plaguicidas y medicamentos veterinarios, así como la divulgación de información transparente a los consumidores, ayudarían a restaurar la confianza en los productos nacionales.

CONCLUSIÓN

Los LMR son una garantía de salud y calidad, pero su cumplimiento depende de la responsabilidad compartida entre autoridades, productores y consumidores. Solo con evidencia científica, regulación efectiva y sistemas de monitoreo robustos, podemos asegurar que los alimentos sean seguros y sostenibles. Consumir con confianza es posible, pero requiere del compromiso de todos y de una vigilancia constante basada en la mejor ciencia disponible.

AGRADECIMIENTOS

Al SECIHTI, por la beca al primer autor y al Colegio de Postgraduados por la formación académica que ha brindado.

Literatura citada



- Díaz-Vallejo, J., Barraza-Villarreal, A., Yáñez-Estrada, L., & Hernández-Cadena, L. (2021). Pesticide residues in food: Health risk and regulation in Veracruz, Mexico. *Salud 2 Pública de México*, 63(4), 486–497.
- EFSA. (2021). The 2019 European Union report on pesticide residues in food.
- FAO/WHO. (2024). Límites máximos de residuos (LMR). *Codex Alimentarius*. https://www.fao.org/fao-who-codexalimentarius/codex-texts/dbs/pestres/en/?utm_source=chatgpt.com
- Handford, C., Elliott, C., & Campbell, K. (2015). A review of the global pesticide legislation and the scale of challenge in reaching the global harmonization of food safety standards.
- Romero, R. (2023). Un veneno oculto en mi plato: 37 agroquímicos con potenciales daños cancerígenos y genotóxicos están en frutas y verduras de los supermercados. *Salud con Lupa*. <https://saludconlupa.com/series/un-veneno-oculto-en-mi-plato/37-agroquimicos-con-potenciales-danos-cancerigenos-y-genotoxicos-estan-en-frutas-y-verduras-de-los-supermercados>
- Salas, J., González, M., Noa, M., Pérez, N., Díaz, G., Gutiérrez, R., Zazueta, H., & Osuna, I. (2003). Organophosphorus pesticide residues in Mexican commercial pasteurized milk. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 51(15), 4468–4471. <https://doi.org/10.1021/jf020942i>.
- Suárez-Jacobo, Á., Alcantar-Rosales, V. M., Alonso-Segura, D., Heras-Ramírez, M., Elizarraga-De La Rosa, D., Lugo-Melchor, O., & Gaspar-Ramírez, O. (2017). Pesticide residues in orange fruit from citrus orchards in Nuevo Leon State, Mexico. *Food Additives & Contaminants: Part B*, 10(3), 192–199. <https://doi.org/10.1080/19393210.2017.1315743>.
- Zikankuba, V., Mwanyika, G., Ntwenya, J., & James, A. (2019). Pesticide regulations and their malpractice implications on food and environment safety. *Cogent Food & Agriculture*, 5(1), Article 1601544. <https://doi.org/10.1080/23311932.2019.1601544>.





Palabras clave: cáncer, sistema inmune, inmunoevasión

Key words: cancer, immune system, immune evasion

EVASIÓN Y RESISTENCIA: EL CÁNCER FRENTE A NUESTRAS DEFENSAS

/// XIMENA VÁZQUEZ-CADENA*, DIANA RESÉNDEZ-PÉREZ*,
VIANEY GONZÁLEZ-VILLASANA*

RESUMEN

El cáncer es una enfermedad compleja que puede aparecer en cualquier parte del cuerpo. Normalmente, el sistema inmunológico, que es el encargado de defendernos se encarga de detectar y eliminar células anormales vigilando que todo esté en orden. Este proceso se llama inmunovigilancia. Sin embargo, el cáncer puede adaptarse y encontrar formas de “escondarse” del sistema inmunológico. A esto se le llama inmunoevasión del cáncer, y ocurre en tres etapas: eliminación, equilibrio y escape. En este artículo, exploraremos qué sucede en cada una de estas etapas y cómo las células malignas logran sobrevivir y avanzar.

ABSTRACT

Cancer is a complex disease that can appear in any part of the body. Normally, the immune system, which is in charge of defending us, is responsible for detecting and eliminating abnormal cells, making sure that everything is in order. This process is called immunosurveillance. However, cancer can adapt and find ways to “hide” from the immune system. This is called cancer immunoevasion, and it occurs in three stages: elimination, balance, and escape. In this article, we will explore what happens at each of these stages and how malignant cells manage to survive and advance.

*Universidad Autónoma de Nuevo León, San Nicolás de los Garza, México

INTRODUCCIÓN

El cáncer es una enfermedad que ocurre cuando las células del cuerpo crecen de manera descontrolada. Normalmente, las células tienen un ciclo de vida ordenado: nacen, realizan su función y mueren. Sin embargo, en el cáncer algo altera este proceso; mutaciones, las cuales pueden ser causadas por diferentes factores. Dichas mutaciones las vuelven más fuertes, resistentes y adaptables, y les dan la capacidad de multiplicarse sin control volviéndolas inmortales. Estas células anormales pueden invadir y dañar los tejidos cercanos y, en algunos casos, viajar a otras partes del cuerpo a través de nuestra sangre, en un proceso llamado metástasis (Guerra González et al, 2020). El cáncer es un enemigo silencioso, pero nuestro cuerpo no se queda de brazos cruzados. Activa su defensa más poderosa: el sistema inmune, que lucha incansablemente contra las células malignas para protegernos.

El sistema inmune es el ejército defensor de nuestro cuerpo, siempre listo para atacar a cualquier enemigo, incluso si surge desde adentro. Su principal misión es encontrar y eliminar a los traidores. Para ello, cuenta con fuerzas especiales como los linfocitos T, linfocitos B y células y moléculas que patrullan y vigilan constantemente, detectando y reportando amenazas. Pero no importa que tan bien equipado esté el ejército o que tan preciso sea su ataque, el enemigo es astuto. Puede volverse invisible, evadir los ataques y adaptarse a nuevas estrategias.

Este proceso de evasión ocurre en tres etapas: eliminación, equilibrio y escape. Es principalmente en la fase de equilibrio donde el enemigo analiza y desarrolla tácticas para sobrevivir. Si logra escapar, representa la derrota para el sistema inmune. Sin embargo, aún hay esperanza: los refuerzos externos, como las terapias, que pueden potenciar al ejército interno y dar una nueva oportunidad de vencer al enemigo. Por lo tanto, conocer al adversario, entender sus estrategias y mecanismos de evasión, es crucial. Solo así se podrán desarrollar terapias más efectivas para atacar a las células de cáncer y apoyar a nuestro sistema inmune a ganar esta batalla.

¿QUÉ ES EL CÁNCER?

Para definirlo primero tenemos que irnos a la unidad básica y fundamental de la vida; la célula. Todos los seres vivos estamos compuestos de células, ya sea que se trate de organismos unicelulares como las bacterias, o de organismos multicelulares como los humanos. Podemos imaginarlas como fabricas pequeñas que cuentan con diferentes departamentos (organelos) que se encargan de que la célula crezca, se reproduzca, genere energía y muera

(apoptosis). Esto siempre bajo la vigilancia de mecanismos de control internos o “guardianes” como proteínas reguladoras (p53) y enzimas (caspasas) encargadas de detectar y corregir errores (Park et al, 2016). ¿Qué pasa cuando estos fallan? la célula empezará a dividirse de manera descontrolada convirtiendo un proceso esencial de la vida en una amenaza, lo que dará lugar lo que dará lugar al cáncer, una acumulación anormal de células (Roy y Saikia, 2016). Esta enfermedad es una de las principales causas de muerte en todo el mundo. De acuerdo con el *INEGI* (2024), en México en el año 2022 se registraron 847 716 defunciones en el país de las cuales el 10.6 % (89 574) se debió a tumores malignos. Según la Organización Mundial de la Salud, el riesgo de desarrollar esta enfermedad aumenta con la edad, ya que los mecanismos de reparación celular se vuelven menos eficaces como parte natural del proceso de envejecimiento.

Existen los tumores benignos y los malignos, la diferencia radica en que los malignos tienen el super poder de transportarse a otras partes del cuerpo utilizando el sistema sanguíneo mientras que los benignos no. Solo los tumores malignos se consideran verdaderamente cáncer (Cooper, 2000).

El cáncer puede tener su origen en cualquier parte del cuerpo por lo que existen diferentes tipos de cáncer, dependiendo del órgano o tejido donde comienza; el cáncer no es una enfermedad aislada, sino un grupo de enfermedades con una falla en común: el descontrol de la división celular derivado de mutaciones genéticas haciendo que las células escapen de los controles normales que regulan su crecimiento y muerte (Kamal et al, 2022).

Hay principalmente 2 categorías de cáncer; los de tipo hematológico que se caracterizan por la proliferación descontrolada de células sanguíneas anormales (Blogdehla, 2025). Este incluye la leucemia (que se origina en la médula ósea), linfomas (origen en los ganglios linfáticos) y mieloma múltiple (origen en médula ósea) (Blogdehla, 2025). Mientras que los tumores cancerígenos de tipo sólidos se originan en los tejidos u órganos del cuerpo, entre los más comunes se encuentran el cáncer de mama, de próstata y pulmón (*SuportaMed*, 2023). El cáncer puede tener muchas consecuencias en el cuerpo y en la vida de una persona, dependiendo del tipo, de la etapa en la que se detecte, y del tratamiento recibido.

A pesar de los avances en la medicina que están logrando que las personas vivan más tiempo y con mejor calidad de vida después de un diagnóstico de cáncer. Los tratamientos actuales: quimioterapia, radioterapia y/o cirugía pueden resultar agresivos. La inmunoterapia es otro tratamiento importante para el

cáncer, en el que se entrena al sistema inmunitario para que reconozca y destruya específicamente las células cancerosas, su combinación con otros tratamientos como quimioterapia o radioterapia está revolucionando la forma de combatir el cáncer (Ashraf et al, 2015).

EL SISTEMA INMUNE

El sistema inmune es como un equipo especializado al que se le ha asignado la función de protegernos. Dentro de este equipo hay dos “batallones” cada uno con habilidades especiales que usaran para enfrentarse a diferentes amenazas. El “batallón mieloide” está compuesto por células que actúan como primera línea de defensa, por ejemplo, los neutrófilos y macrófagos que atacan rápida y efectivamente a los invasores como bacterias y virus (Lecturio, 2025). Estas células son las primeras en llegar al lugar del problema. Su rapidez y efectividad son clave para contener la amenaza antes de que se vuelva más grande, sin embargo, no siempre la eliminan por completo ya que se necesita de un ataque más especializado: el batallón linfóide está entrenado para llevar a cabo un ataque más dirigido y letal, sus tropas, como las células T y células B están preparadas para luchar contra amenazas más sofisticadas como células infectadas por virus o células tumorales (Matta Camacho, 2011). Cada batallón tiene su misión, pero ambos operan bajo el mismo mando con la finalidad de trabajar unidos y crear un ataque coordinado cuando el cuerpo se encuentra en peligro.

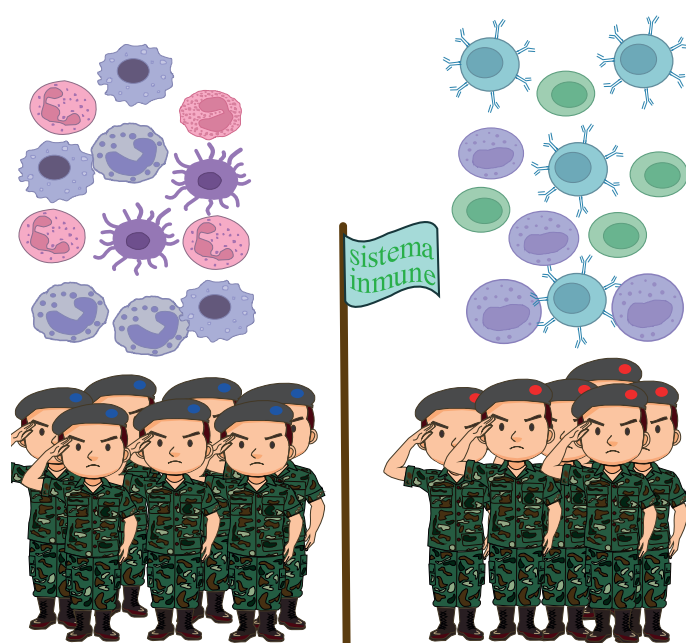


Figura 1. El sistema inmune representado como soldados listos para la guerra. Del lado izquierdo el “batallón mieloide” (punto azul en la boina) con algunas células como neutrófilos y macrófagos y del lado derecho el “batallón linfóide” (punto rojo en la boina) con las células T y células B.

Existen diferentes mecanismos por los cuales nuestro sistema inmune puede diferenciar a una célula sana de una maligna y proceder al ataque en caso de ser esta maligna, un proceso conocido como inmunovigilancia (Dunn et al, 2004). Desafortunadamente en algunos casos la célula dañada se las arregla para escapar o esconderse de estos mecanismos progresando a una célula cancerígena que pone en riesgo nuestra salud y vida. Para poder llegar a ese punto el enemigo necesita primero hacer un proceso de edición, conocido como immunoedición (Vinay et al, 2015). ¿Y qué es esto? Básicamente se compone de tres fases: eliminación, equilibrio y escape.

FASES DE LA INMUNOEDICIÓN

1. FASE DE ELIMINACIÓN (INMUNOVIGILANCIA): CÉLULAS EN ALERTA Y PATRULLANDO

En la fase de eliminación, el sistema inmunológico mantiene una vigilancia constante para detectar señales anormales en las células. Cuando todo está en equilibrio, las células sanas funcionan correctamente y no generan alertas. Sin embargo, si una célula comienza a volverse maligna, envía señales de peligro o pierde ciertas características que la identifican como segura. Esto alerta a las patrullas inmunológicas, como las células natural killer (NK) y los linfocitos T, ambas pertenecientes al batallón linfóide. Las NK son una especie de fuerza especial del sistema inmune: Mace (2023) explica que pueden reconocer cuándo una célula es del propio cuerpo y cuándo se ha vuelto extraña o peligrosa, como ocurre en infecciones virales o en células que comienzan a volverse cancerosas. Actúan con rapidez y precisión, destruyendo las células dañadas antes de que el cáncer pueda desarrollarse (Dhatchinamoorthy et al, 2021).

2. FASE DE EQUILIBRIO: EL JUEGO DE TIRA Y AFLOJA

Esta es una fase intermedia y prolongada en donde nuestro cuerpo ha logrado eliminar muchas células malignas, pero no a todas. En este punto el sistema inmune aprende a mantenerlas a raya evitando así su multiplicación. Se vuelve como un juego de tira y afloja quedando en un punto medio que puede durar meses, años o incluso décadas, en un estado de latencia o “hibernación”, sin manifestar síntomas (Quezada et al, 2011).

Es una fase donde el cáncer engaña al sistema inmune haciéndolo creer que hay una tregua, sin embargo, esto no es así ya que durante todo este tiempo el cáncer se va adaptando y mutando, afinando sus armas para así poder liberarse de esta represión que el sistema inmune está ejerciendo. “Lo que no te mata te hace más fuerte”.

3. FASE DE ESCAPE: EL ENEMIGO TRIUNFA

En esta etapa, el enemigo logra su victoria, y el ejército defensor ha sido derrotado. Ahora, las células malignas se han adaptado lo suficiente para evadir por completo el ataque del sistema inmune. Es como si se liberaran de sus cadenas, sin nada que las detenga. El tumor comienza a crecer sin control, se fortalece y puede incluso esparcirse a otras partes del cuerpo (metástasis). Es en este punto cuando el cáncer se vuelve especialmente peligroso. Pero ¿cómo logra escapar? ¿Cuáles son las estrategias que utiliza para asegurar su supervivencia y expansión?

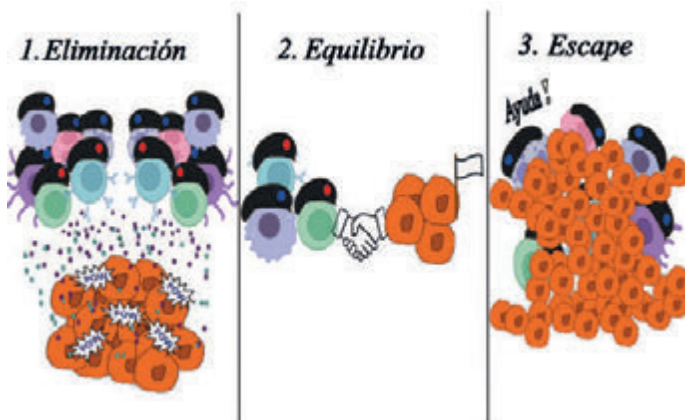


Figura 2. Las fases de la inmunoección. Fase 1 eliminación: las células soldado atacan con toda su artillería. Fase 2 equilibrio: muchas células malignas fueron eliminadas, se rinden y fingen una tregua. Fase 3 escape: las células malignas se fortalecieron y ahora han vencido al sistema inmune.

ESTRATEGIAS DE EVASIÓN/ESCAPE

FORMACIÓN DE UN REFUGIO

Las células malignas no actúan solas; esta estrategia consiste en agruparse entre ellas formando un entorno conocido como microambiente tumoral, el cual funciona como su refugio protegiéndolas de ataques externos, como los del sistema inmunológico. Para entenderlo mejor podemos asociarlo con un cardumen de peces: cuando los peces nadan solos en el mar, están expuestos a sus depredadores. Sin embargo, al agruparse, sus posibilidades de sobrevivir aumentan. De manera similar, las células malignas se rodean de otras células y moléculas que las ayudan a sobrevivir y a evitar ser detectadas o atacadas (Puleo y Polyak, 2021).

El microambiente tumoral está formado tanto de células malignas como de no malignas; fibroblastos, células estromales, células inmunitarias y otros componentes como vasos sanguíneos, matriz extracelular (MEC), además de moléculas de señalización. Estos elementos contribuyen al desarrollo y progresión del tumor al interactuar con las células cancerosas (Hui y Chen, 2015).

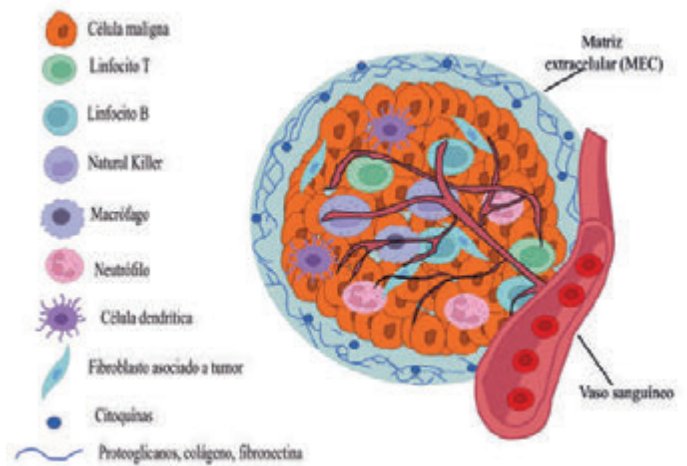


Figura 3. Representación del microambiente tumoral. Conformado principalmente por células malignas, y otras células del sistema inmune, así como de vasos sanguíneos que lo nutren y lo ayudan a sobrevivir.

DESACTIVACIÓN/MUERTE DE LOS SOLDADOS: PUNTOS DE CONTROL INMUNITARIOS

Durante una enfermedad, las células del sistema inmune, nuestro ejército defensor, se encargan de combatir al enemigo con toda su maquinaria, ya sea un virus, una bacteria o células tumorales. Sin embargo, una vez ganada la batalla, es crucial poner un "candado" al sistema, enviándole una señal de apágate o desactívale. Esto asegura que, tras la victoria, los soldados no sigan disparando y puedan dañar a las células buenas por error.

Este "candado" funciona gracias a un sistema de comunicación entre las células. Para enviarse señales, utilizan proteínas que se encuentran en su superficie, conocidas como puntos de control inmunitarios. Estas proteínas interactúan entre sí en un proceso llamado interacción proteína-proteína (Liu et al, 2022).

Entre estas proteínas se encuentran PD-L1 (ligando 1 de muerte programada) y PD-1 (proteína 1 de muerte programada), que al unirse envían una señal a la célula inmune para que se desactive o muera (Tang et al, 2022). Según Zheng et al. (2019), estas proteínas suelen estar en células distintas: PD-L1 se encuentra en células como las presentadoras de antígenos, las células madre mesenquimales y los mastocitos derivados de la médula ósea, mientras que PD-1 está presente principalmente en células T, monocitos, células natural killer y macrófagos. Las células que tienen PD-1, principalmente los linfocitos T, son las responsables de llevar a cabo los ataques más letales y específicos del sistema inmune, por lo que es necesario que vengan equipadas con un mecanismo de regulación para evitar daños colaterales a tejidos que se encuentran sanos (Han et al, 2020).

Las células cancerígenas han aprovechado este mecanismo. Algunas producen PD-L en su superficie como un escudo, evitando no solo el ataque de las células T, sino también desactivándolas al unirse con el PD expresado en su superficie, engaña a los soldados haciéndolos pensar que ganaron la batalla y ya pueden descansar. Esto es una gran ventaja para el enemigo, permitiéndoles crecer y multiplicarse sin ser molestadas (Tang et al, 2022).

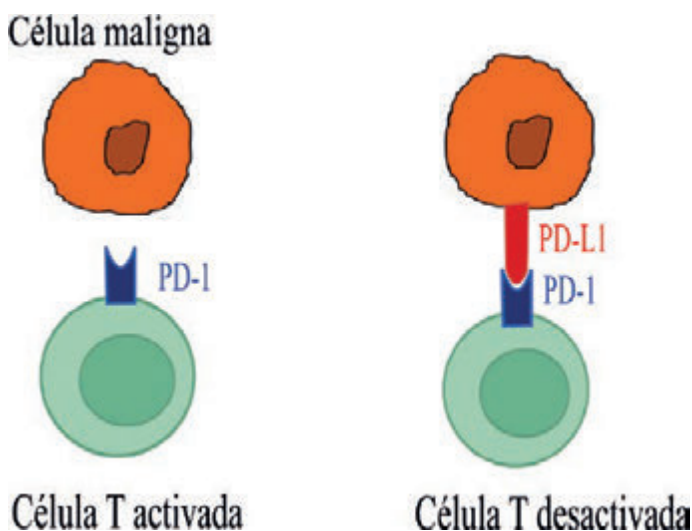


Figura 4. Puntos de control inmunitarios. La célula T se desactiva al unir su PD-1 con el PD-L1 presente en la membrana de la célula maligna. PD-1 representa un mecanismo de regulación de la célula T.

SEÑALES INMUNOLÓGICAS MANIPULADAS: UN ARMA DEL TUMOR
Las citoquinas son moléculas que son producidas por las células del sistema inmune y otras células del cuerpo, su función es enviar señales y reclutar a más células del sistema inmune, sumándolas a la batalla contra cualquier intruso (Reyes y García, 2013). Estas señales tienen diferentes funciones: algunas indican dónde se necesita la ayuda, mientras que otras fortalecen a las células inmunológicas, promoviendo su crecimiento y maduración para hacer más eficiente su ataque. Sin embargo, también existen citoquinas que “tranquilizan” al sistema inmune, ayudando a regular su actividad según la situación lo requiera.

Pero ¿cómo usa el enemigo estas señales para su beneficio? El microambiente tumoral (TME, por sus siglas en inglés) recluta y corrompe células inmunológicas que, en lugar de atacar al tumor, terminan produciendo citoquinas como TGF- β , IL-10 e IL-4, conocidas por su capacidad para “calmar” la respuesta inmune. Esta estrategia le permite al tumor crear una especie de doble escudo, combinando la acción de estas citoquinas inmunosupresoras con el microambiente tumoral, lo que confunde a las células inmunológicas e impide que actúen de manera efectiva (Mirlekar, 2022).

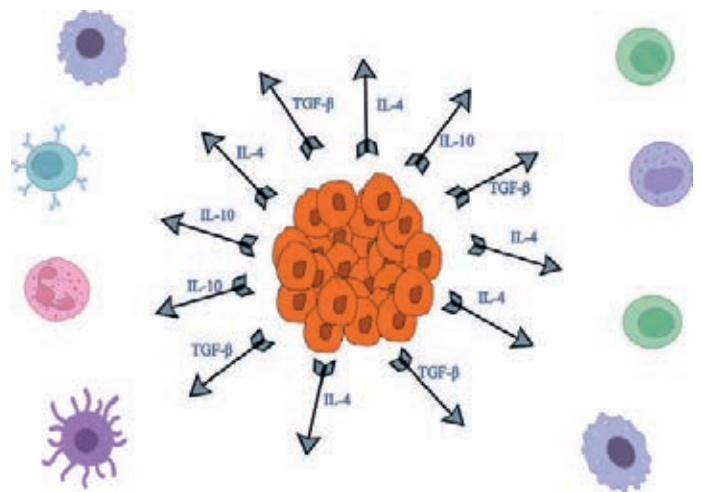


Figura 5. Las células malignas manipulan al sistema inmunológico a través de citoquinas como IL-4, IL-10 y TGF- β , representadas como flechas de color azul, que actúan sobre las células inmunitarias para debilitarlas e impedir que respondan de manera efectiva.

LIF

Otro factor que juega un papel importante es una interleucina, familiar de las citoquinas, llamada LIF (del inglés *leukemia inhibitory factor*) (Nicola y Babon, 2015). En circunstancias normales, LIF protege al bebé mientras se está formando en la viente de su mamá, ¿de qué lo protege? Del propio sistema inmune de la madre, como se mencionó anteriormente el sistema inmune ataca a todo lo que no reconoce como propio, y como sabemos un bebé tiene en su genética 50% de la madre, pero el otro 50% es del padre (externo a la madre). Por otra parte, LIF puede ser una espada de doble filo. De alguna manera el enemigo se entera de esta función de protección de LIF y la adquiere como protección para él, es decir, LIF protegerá al tumor como si fuera el bebé (Pascual-García et al, 2019). Algunos tumores pueden expresar grandes cantidades de LIF mientras que otros no lo expresan (Ye et al, 2008).

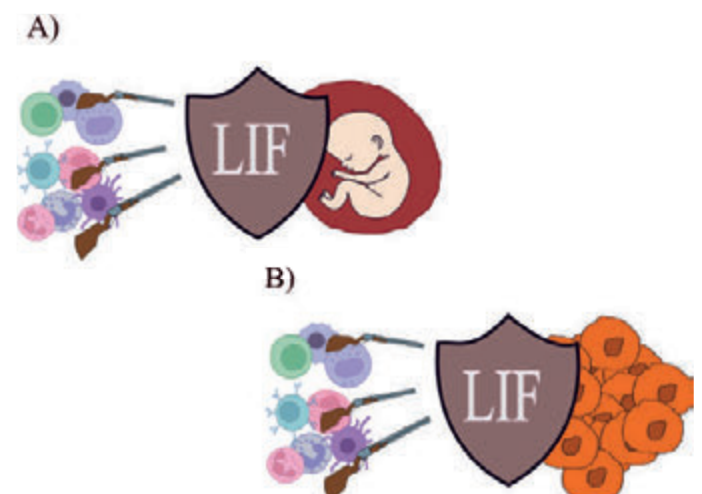


Figura 6. La función normal de la interleucina LIF es proteger al embrión del sistema inmune de la madre (A). Sin embargo, las células malignas adquieren esta función y la usan como escudo para evitar el ataque del sistema inmune (B).

“No ME COMAS” CD47

Los macrófagos son un tipo de células de nuestro sistema inmune que tienen una manera muy especial de defendernos: se come a los intrusos y los degrada dentro de él. ¿Como saben los macrófagos cuando no comerse a una célula? Esto es porque nuestras células sanas tienen una proteína en su membrana llamada CD47 que evita que estas sean devoradas por los macrófagos dando una señal de “no me comas”. Cuando una célula es muy vieja o está defectuosa pierde a CD47, por lo cual queda expuesta a ser la comida de un macrófago. El enemigo se pone paranoico y evita a toda costa su muerte, por lo que otra de sus estrategias se basa en sobreexpresar a CD47 en su membrana, es decir, habrá muchas de estas proteínas en su superficie protegiéndolo de ser devorado, y un macrófago podrá pasar a su lado creyendo que todo está en orden, sin detectar el peligro (Huang et al, 2022).

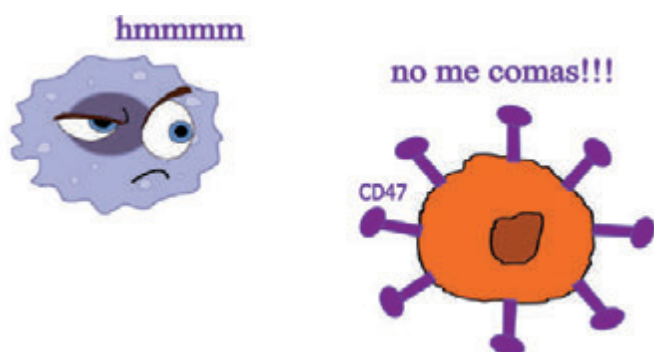


Figura 7. Se observa a un macrófago confundido al darse cuenta de que una célula maligna tiene varios CD47 expresados en su superficie dando la señal de “no me comas” por lo tanto el macrófago no atacará al cáncer.

Estos mecanismos de evasión nos muestran que la lucha contra el cáncer ha sido tan antigua como persistente, una batalla que la humanidad ha enfrentado desde hace miles de años. Los primeros registros sobre esta enfermedad datan del antiguo Egipto, alrededor del año 2500 a.C (López y Cardona, 2021). Sin embargo, en aquel entonces no se comprendía realmente lo que era el cáncer y mucho menos como tratarlo. Hoy en día conocemos mejor a nuestro enemigo, ha sido observado y estudiado cuidadosamente a lo largo de los años, esto es lo que ha permitido el desarrollo de mejores terapias para brindarle una ayuda externa o refuerzo a nuestro ejército interno y fortalecerlo acercándonos cada vez más a la victoria.

DISCUSIÓN

A lo largo de este artículo, hemos visto que el sistema inmune es la clave para el control y la eliminación de amenazas, asegurándose así de mantener el equilibrio en nuestro cuerpo. Sin embargo, puede ser derrotado

por las células tumorales. Ling et al. (2022) nos dice que, a diferencia de otros métodos para tratar el cáncer (como la quimioterapia y la radioterapia), la inmunoterapia se enfoca en fortalecer nuestro propio sistema inmune para identificar y combatir las células malignas, proporcionando así una estrategia natural para frenar el avance de la enfermedad.

De acuerdo con Liu et al. (2021) la interacción proteína-proteína basada en PD-1/PD-L1 es un mecanismo prometedor en la inmunoterapia del cáncer y su comprensión es clave. Los inhibidores de PD-1 y PD-L1 han mostrado ser clínicamente efectivos en diversos tipos de tumores. Por ejemplo, el uso de anticuerpos específicos para bloquear PD-1 mejora la respuesta de las células T promoviendo así una actividad antitumoral. Nivolumab y pembrolizumab son los dos primeros anticuerpos anti-PD-1 que han recibido la aprobación de la Food and Drug Administration (FDA) estadounidense para su uso en pacientes (Fessas et al, 2017).

Además, las vacunas contra el cáncer han comenzado a ganar relevancia como un tema de investigación destacado después del éxito de los anticuerpos (Wu et al, 2024). El objetivo principal de estas vacunas terapéuticas es lograr la regresión del tumor, eliminar cualquier resto mínimo de enfermedad, establecer una memoria inmunológica duradera contra el cáncer y evitar efectos secundarios no deseados o reacciones adversas (Saxena et al, 2021).

Un mecanismo clave para que estas vacunas sean efectivas es su capacidad de atacar el microambiente tumoral y sus componentes. Este proceso incluye la activación de las células T, que luego se infiltran en el microambiente tumoral. Una vez ahí, las células T reconocen las células malignas y las elimina (Sheikhly et al, 2024).

Walsh et al. (2023) mencionan que entre las estrategias terapéuticas más efectivas dentro de la inmunoterapia contra el cáncer están las terapias que usan citocinas para activar el sistema inmunológico. Algunas, como el interferón alfa (INF- α) o la interleucina-2 (IL-2), ya se usan para tratar ciertos tipos de cáncer, mientras que otras, como la IL-12, IL-15, IL-21 y el GM-CSF (Factor Estimulante de Colonias de Granulocitos y Macrófagos), se están probando en ensayos clínicos (Waldmann, 2018). También se incluyen las terapias que emplean células inmunitarias modificadas para atacar directamente al tumor y aquellas que bloquean los mecanismos que frenan la acción del sistema inmunológico, como las proteínas CTLA-4 (Antígeno 4 del Linfocito T Citotóxico) y PD-1/PD-L1.

Estas innovaciones han demostrado ser herramientas poderosas en la lucha contra el cáncer. Sin embargo,

no todos los pacientes responden de la misma manera a estas terapias, y su eficacia puede variar según el sistema inmune de la persona (Wen et al., 2025). Además, los efectos secundarios, como las respuestas inmunitarias exageradas que pueden derivar en autoinmunidad, representan un desafío significativo que los investigadores aún deben resolver para garantizar tratamientos más seguros y efectivos para todos.

El cáncer utiliza diversos mecanismos para evadir al sistema inmune, lo que hace su control y tratamiento

extremadamente complejo. Existen más mecanismos de evasión que los mencionados en este artículo, muchos de los cuales aún son incomprensibles, por lo tanto, profundizar en el estudio de estos procesos es crucial para desarrollar estrategias terapéuticas más efectivas y detener su progresión.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a la Dra. Alejandra Arreola Triana por su apoyo en la edición de este manuscrito.



Literatura citada



- Ashraf, S., Nowsheen, S., Yang, X., Choi, B.K., Kwon, B.S. 2015. Cancer immune evasion: Mechanistic bases and therapeutic strategies. *Seminars in Cancer Biology*, 35(1): S185–S198. <https://doi.org/10.1016/j.semcancer.2015.03.004>.
- Blogdehla. 2025. Cáncer hematológico: qué es, tipos y tratamiento. En: <https://blogdehla.azurewebsites.net/cancer-hematologico-que-es-tipos-y-tratamiento/> (consultado el 13/10/2025).
- Dhatchinamoorthy, K., J.D. Colbert, K.L. Rock. 2021. Cancer immune evasion through loss of MHC class I antigen presentation. *Frontiers in Immunology*. 12:636568. <https://doi.org/10.3389/fimmu.2021.636568>
- Dunn, G.P., L.J. Old, R.D. Schreiber. 2004. The immunobiology of cancer immunosurveillance and immunoediting. *Immunity*. 21(2):137–148. <https://doi.org/10.1016/j.immuni.2004.07.017>
- Fessas, P., H. Lee, S. Ikemizu, T. Janowitz. 2017. A molecular and preclinical comparison of the PD-1–targeted T-cell checkpoint inhibitors nivolumab and pembrolizumab. *Seminars in Oncology*. 44(2):136–140. <https://doi.org/10.1053/j.seminoncol.2017.06.002>
- Cooper, G.M. 2000. *The Cell: A Molecular Approach*. 2ª ed. Sinauer Associates, Sunderland, Massachusetts, 689 pp.
- Guerra González, A., E. Silva, S. Montero, D.J. Rodríguez, R. Mansilla, J.M. Nieto-Villar. 2020. Metástasis: un hito para el conocimiento, un reto para la ciencia. *Revista Cubana de Medicina*. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0034-75232020000100006&lng=es&tng=es
- Han, Y., D. Liu, L. Li. 2020. PD-1/PD-L1 pathway: current researches in cancer. *PubMed*. 10(3):727–742. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/32266087>
- Huang, J., F. Liu, C. Li, X. Liang, C. Li, Y. Liu, Z. Yi, L. Zhang, S. Fu, Y. Zeng. 2022. Role of CD47 in tumor immunity: a potential target for combination therapy. *Scientific Reports*. 12(1):13764. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-13764-3>
- Hui, L., Y. Chen. 2015. Tumor microenvironment: Sanctuary of the devil. *Cancer Letters*. 368(1):7–13. <https://doi.org/10.1016/j.canlet.2015.07.039>
- INEGI. 2024. Estadísticas a propósito del día mundial contra el cáncer. En: <https://www.inegi.org.mx> (consultado el 01/02/2025).
- Kamal, N., M.A. Ilowefah, A.R. Hilles, N.A. Anua, T. Awin, H.A. Alshwyeh, S.K. Aldosary, N.G.S. Jambocus, A.A. Alosaimi, A. Rahman, S. Mahmood, A. Mediani. 2022. Genesis and mechanism of some cancer types and an overview on the role of diet and nutrition in cancer prevention. *Molecules*. 27(6):1794. <https://doi.org/10.3390/molecules27061794>
- Lecturio. 2025. Células mieloides blancas. En: <https://www.lecturio.com/es/concepts/celulas-mieloides-blancas/> (consultado el 13/10/2025).
- Ling, S.P., L.C. Ming, J.S. Dhaliwal, M. Gupta, C. Ardianto, K.W. Goh, Z. Hussain, N. Shafqat. 2022. Role of immunotherapy in the treatment of cancer: A systematic review. *Cancers*. 14(21):5205. <https://doi.org/10.3390/cancers14215205>
- Liu, C., M. Yang, D. Zhang, M. Chen, D. Zhu. 2022. Clinical cancer immunotherapy: Current progress and prospects. *Frontiers in Immunology*. 13:961805. <https://doi.org/10.3389/fimmu.2022.961805>
- Liu, J., Z. Chen, Y. Li, W. Zhao, J. Wu, Z. Zhang. 2021. PD-1/PD-L1 checkpoint inhibitors in tumor immunotherapy. *Frontiers in Pharmacology*. 12:731798. <https://doi.org/10.3389/fphar.2021.731798>
- López, M.M., A.F. Cardona. 2021. Historia del cáncer y el cáncer en la historia. *Medicina*. 42(4):528–562. <https://doi.org/10.56050/01205498.1559>
- Mace, E.M. 2023. Human natural killer cells: form, function, and development. *The Journal of Allergy and Clinical Immunology*. 151(2): 371–385. <https://doi.org/10.1016/j.jaci.2022.09.022>
- Matta Camacho, N.E. 2011. Sistema inmune y genética: un abordaje diferente a la diversidad de anticuerpos. *Acta Biológica Colombiana*. 16(3): 177–188. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0120-548X2011000300012
- Mirlekar, B. 2022. Tumor promoting roles of IL-10, TGF- β , IL-4, and IL-35: Its implications in cancer immunotherapy. *SAGE Open Medicine*. 10:1–13. <https://doi.org/10.1177/20503121211069012>
- Nicola, N.A., J.J. Babon. 2015. Leukemia inhibitory factor (LIF). *Cytokine & Growth Factor Reviews*. 26(5):533–544. <https://doi.org/10.1016/j.cytogfr.2015.07.001>
- Park, J.H., J. Zhuang, J. Li, P.M. Hwang. 2016. p53 as guardian of the mitochondrial genome. *FEBS Letters*. 590(7):924–934. <https://doi.org/10.1002/1873-3468.12061>
- Pascual-García, M., E. Bonfill-Teixidor, E. Planas-Rigol, C. Rubio-Perez, R. Iurlaro, A. Arias, I. Cuartas, A. Sala-Hojman, L. Escudero, F. Martínez-Ricarte, I. Huber-Ruano, P. Nuciforo, L. Pedrosa, C. Marques, I. Braña, E. Garralda, M. Vieito, M. Squatrito, E. Pineda, F. Graus, C. Espejo, J. Sahuquillo, J. Tabernero, J. Seoane. 2019. LIF regulates CXCL9 in tumor-associated macrophages and prevents CD8+ T cell tumor-infiltration impairing anti-PD-1 therapy. *Nature Communications*. 10:2416. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-10369-9>
- Puleo, J., K. Polyak. 2021. A Darwinian perspective on tumor immune evasion. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA) - Reviews on Cancer*. 1877(1):188671. <https://doi.org/10.1016/j.bbcan.2021.188671>
- Quezada, S.A., K.S. Peggs, T.R. Simpson, J.P. Allison. 2011. Shifting the equilibrium in cancer immunoediting: from tumor tolerance to eradication. *Immunological Reviews*. 241(1):104–118. <https://doi.org/10.1111/j.1600-065X.2011.01007.x>
- Reyes García, M.G., F. García Tamayo. 2013. Citocinas, inflamación y conducta. *Vertientes. Revista Especializada en Ciencias de la Salud*. 8:4–13. <https://biblat.unam.mx/es/revista/vertientes-mexico-d-f/articulo/citocinas-inflamacion-y-conducta>
- Roy, P.S., B.J. Saikia. 2016. Cancer and cure: A critical analysis. *Indian Journal of Cancer*. 53(3):441–442. <https://doi.org/10.4103/0019-509X.200658>
- Saxena, M., S.H. van der Burg, C.J.M. Melief, N. Bhardwaj. 2021. Therapeutic cancer vaccines. *Nature Reviews Cancer*. 21(6):360–378. <https://doi.org/10.1038/s41568-021-00346-0>
- Sheikhlary, S., D.H. López, S. Moghimi, B. Sun. 2024. Recent Findings on Therapeutic Cancer Vaccines: An Updated Review. *Biomolecules*. 14(4):503. <https://doi.org/10.3390/biom14040503>
- SuportaMed. 2023. Clasificación y tipos de cáncer. Clínica de Alta Especialidad. Disponible en: <https://suportamed.com/cancer-clasificacion-tipos/> (consultado el 08/02/2025).

- Tang, Q., Y. Chen, X. Li, S. Long, Y. Shi, Y. Yu, W. Wu, L. Han, S. Wang. 2022. The Role of PD-1/PD-L1 and the Application of Immune Checkpoint Inhibitors in Human Cancers. *Frontiers in Immunology*. 13:964442. <https://doi.org/10.3389/fimmu.2022.964442>
- Vinay, D.S., E.P. Ryan, G. Pawelec, W.H. Talib, J. Stagg, E. Elkord, T. Lichter, W.K. Decker, R.L. Whelan, H.M.C.S. Kumara, E. Signori, K. Honoki, A.G. Georgakilas, A. Amin, W.G. Helferich, C.S. Boosani, G. Guha, M.R. Ciriolo, S. Chen, S.I. Mohammed, A.S. Azmi, W.N. Keith, A. Bilsland, D. Bhakta, D. Halicka, H. Fujii, K. Aquilano, B.S. Kwon. 2015. Immune evasion in cancer: Mechanistic basis and therapeutic strategies. *Seminars in Cancer Biology*. 35 (1): 185–198. <https://doi.org/10.1016/j.semcancer.2015.03.004>
- Waldmann, T.A. 2018. Cytokines in cancer immunotherapy. *Cold Spring Harbor Perspectives in Biology*. 10(12): a028472. <https://doi.org/10.1101/cshperspect.a028472>
- Walsh, M.J., C.T. Stump, R. Kureshi, M. Dougan, D.M. Knipe, S.K. Dougan. 2023. IFN γ is a central node of cancer immune equilibrium. *Cell Reports*. 42(3):112219. <https://doi.org/10.1016/j.celrep.2023.112219>
- Wen, J., Y. Wang, S. Wang, Y. Liang, X. Hu, Q. Ou, H. Bao, K. Zhao, Y. Wang, X. Xu, C. Zhang, Z. Li, L. Chen, y H. Zhang. 2025. Genetic and transcriptional insights into immune checkpoint blockade response and survival: lessons from melanoma and beyond. *Journal of Translational Medicine*. 23: 467. <https://doi.org/10.1186/s12967-025-06467-6>
- World Health Organization (WHO). 2022. Cáncer. En: <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/cancer> (consultado el 08/02/2025).
- Wu, D.-W., S.-P. Jia, S.-J. Xing, H.-L. Ma, X. Wang, Q.-Y. Tang, Z.-W. Li, Q. Wu, M. Bai, X.-Y. Zhang, X.-F. Fu, M.-M. Jia, Y. Tang, L. Chen, N. Li. 2024. Tumor Neoantigen Personalized Vaccines: Current Progress, Challenges, and Promising Future. *Clinical and Experimental Medicine* 24(1):229. <https://doi.org/10.1007/s10238-024-01436-7>Formularbeginn
Formularende
- Ye, F., Y. Hu, W. Lu, C. Zhou, X. Xie. 2008. Expression of leukaemia inhibitory factor in epithelial ovarian carcinoma: correlation with clinical characteristics. *Histopathology* 53(2):224-228. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2559.2008.03068.x>
- Zheng, Y., Y.-C. Fang, J. Li. 2019. PD-L1 expression levels on tumor cells affect their immunosuppressive activity. *Oncology Letters* 18(5):5399-5407. <https://doi.org/10.3892/ol.2019.10903>



LA INFLUENCIA DEL CLIMA EN LA MIGRACIÓN DEL COLIBRÍ ZUMBADOR CANELO

**THE INFLUENCE OF WEATHER
IN THE MIGRATION OF THE
RUFIOUS HUMMINGBIRD**

/// EDSON A. ALVAREZ-ALVAREZ*,
R. CARLOS ALMAZÁN-NÚÑEZ Y L.
GERARDO HERRERA M.

*Departamento de Fortalecimiento a la Investigación e Innovación
Tecnológica, Consejo de Ciencia, Tecnología e Innovación del Estado de
Guerrero. C.P. 39090, Chilpancingo, Guerrero, México.

RESUMEN

Existen 13 especies de colibríes que son migratorios; es decir, que se reproducen en unas zonas y pasan el invierno en otras, viajando entre distintas áreas geográficas en Norteamérica. Durante su migración, los colibríes encuentran variaciones en el clima que determinan sus patrones de migración y distribución. Este es el caso del colibrí zumbador canelo (*Selasphorus rufus*), una especie casi amenazada y que en primavera-verano se reproduce en Canadá y Estados Unidos de América (EUA), y en otoño-invierno se encuentra en el sureste de EUA y sur de México. En esta contribución documentamos las condiciones climáticas bajo las que se desarrolla esta especie en sus áreas reproductiva e invernales mediante modelos de nicho ecológico y de distribución de especies. Existen variables climáticas comunes que nos permiten caracterizar los nichos ecológicos de las especies, como la temperatura, precipitación y radiación solar. Una vez caracterizados los nichos, podemos proyectarlos y recuperar también su distribución geográfica. Sin embargo, el cambio climático y la pérdida de hábitat, impulsados por actividades humanas, podrían modificar los patrones de migración y las áreas de distribución del zumbador canelo.

ABSTRACT

13 hummingbird species are considered migratory; that is, they breed in certain regions and winter in others, traveling between different geographic areas across North America. During these journeys, hummingbirds encounter climatic variations that impact their migration and distribution patterns. This is particularly true for the Rufous Hummingbird (*Selasphorus rufus*), a near-threatened species that breeds in the United States during spring and summer, and winters in the south-central Mexico, southeastern-northeastern United States, and southeastern Canada during fall and winter. In this contribution we documented the climatic conditions under which this species develops in its breeding and wintering areas using ecological niche and species distribution models. Some common climatic variables such as temperature, precipitation, and solar radiation, allow us to characterize the ecological niches of species. Once these niches are characterized, we can project their geographic distribution. However, climate change and habitat loss, driven by human activities, could alter the migration patterns and distribution areas of the Rufous Hummingbird.



Palabras clave: área invernāl, área reproductiva, estacionalidad, *Selasphorus rufus*, Norteamérica.

Keywords: North America, reproductive area, seasonality, *Selasphorus rufus*, wintering area.

INTRODUCCIÓN

La migración de las aves es uno de los fenómenos más fascinantes y enigmáticos, porque son centenares de especies las que realizan estos movimientos. Los colibríes, por ejemplo, son sorprendentemente capaces de moverse a grandes distancias geográficas para conseguir alimento y tener condiciones climáticas adecuadas para subsistir y reproducirse (Fig. 1; Somveille et al., 2015; Thorup et al., 2017).

Cuando los días comienzan a tener menos horas de luz, aumenta el frío y disminuye el alimento, llega el momento en que las aves migratorias de todas las formas, colores y tamaños comienzan su migración. Cada año, millones de individuos de casi 400 especies de aves migratorias recorren miles de kilómetros cruzando ciudades, océanos, desiertos y montañas desde sus áreas reproductivas en las zonas frías y polares del hemisferio norte hasta sus áreas invernales en las zonas tropicales del hemisferio sur.

A lo largo de su migración, las especies enfrentan diversas amenazas como depredadores, muerte por colisión, pérdida de hábitat y contaminación lumínica, entre otras (Nemes et al., 2023). Las variaciones en el clima determinan la distribución de las especies y sus rutas de migración, así como los cambios fenológicos de las plantas, los cuales a su vez determinan la conducta migratoria de las especies (Haest et al., 2018; Somveille et al., 2015). En esta contribución documentamos la influencia del

clima (temperatura, precipitación y radiación solar) en el nicho ecológico y la distribución geográfica del colibrí zumbador canelo en sus áreas reproductiva e invernales en Norteamérica a partir de modelos de nicho ecológico y de distribución de especies.

EL CLIMA EN LA MIGRACIÓN DEL COLIBRÍ ZUMBADOR CANELO

Durante la última década, se ha documentado que las aves migratorias son vulnerables al cambio climático. Este fenómeno ha afectado su conducta migratoria, tamaño corporal y distribución geográfica (Rushing et al., 2020). De hecho, se espera que las áreas de idoneidad ambiental de muchas aves migratorias disminuyan, lo que ocasionará que las especies tiendan a buscar nuevos sitios ambientalmente idóneos de acuerdo a sus rangos fisiológicos de tolerancia.

Hasta la fecha, de las 13 especies de colibríes migratorios, solo se ha documentado la influencia del clima en la migración del colibrí zumbador cola ancha (*Selasphorus platycercus*; Hernández-Hernández et al., 2022). Para el resto de las especies de colibríes, las condiciones climáticas que determinan su migración y distribución siguen siendo desconocidas. En este sentido, un modelo para estudiar la variación climática durante la migración es el zumbador canelo (*Selasphorus rufus*). Este colibrí es de tamaño



Figura 1. El colibrí zumbador canelo comiendo néctar del garbancillo (*Duranta erecta*) en una zona residencial en Tuxtla Gutiérrez, Chiapas. Fotografía: David Pineda Vera

Figura 2. El colibrí zumbador canelo mostrando el brillante plumaje de su cuello en una zona residencial en Tuxtla Gutiérrez, Chiapas. Fotografía: David Pineda Vera



mediano, mide de 7 a 9 cm de longitud y pesa de 2 a 5 g (Gillespie et al., 2020; Healy y Calder, 2020). Las características distintivas del macho son la cabeza, dorso y vientre color canela-anaranjado brillante, el cuello rojo-anaranjado iridiscente y un punto blanco ubicado detrás del ojo (Fig. 2).

El zumbador canelo lleva a cabo una de las migraciones más largas, viajando más de 4,000 km principalmente desde el sur de Alaska hasta el suroeste de México (Supp et al., 2015). Este colibrí se reproduce de mayo a junio desde el sureste de Alaska hasta el noroeste de los EUA (Healy y Calder, 2020; Alvarez-Alvarez et al., en prensa). Realiza su migración de primavera de febrero a abril, y la de otoño de julio a octubre (Alvarez-Alvarez et al., en prensa). Posteriormente, de octubre a enero se encuentra en el sur, centro y oeste de México, así como en el surest-noreste de los EUA y sureste de Canadá (Healy y Calder, 2020; Alvarez-Alvarez et al., en prensa). Además, este colibrí hace paradas para recuperar energía, fortalecer sus músculos y reponer sus reservas de grasa, alimentándose de al menos 66 especies de plantas a lo largo de sus rutas migratorias (Schondube et al., 2004; Gillespie et al., 2020).

El zumbador canelo es un colibrí que tolera una alta variación climática en su área de distribución. Por ejemplo, las elipses muestran que el área reproductiva tiene un mayor tamaño, lo que significa que el nicho climático de esta área es más amplio en comparación con las dos áreas invernales (Fig. 3). Esta variación se traduce en que el colibrí zumbador canelo ocupa condiciones climáticas con rangos distintos de temperatura, precipitación y radiación solar entre sus áreas reproductiva e invernales (Fig. 3). La razón principal de esto se debe a la tolerancia fisiológica del zumbador canelo; es decir, a su capacidad de habitar un rango más amplio de climas subárticos a tropicales, temperaturas de 1.2 °C a 24.1 °C, y una variedad de ecosistemas como

pastizales de alta montaña y bosques tropicales secos, templados y húmedos.

Además del efecto directo del clima sobre los movimientos estacionales del zumbador canelo, las condiciones climáticas también influyen indirectamente en la fenología y disponibilidad de alimento en las plantas de las que se alimenta. Durante el invierno, además de las condiciones climáticas adversas que enfrenta el zumbador canelo en su área de reproducción, el alimento disminuye. Por el contrario, en las áreas invernales, las temperaturas moderadas, las lluvias regulares y la mayor radiación solar permiten una mayor actividad fotosintética de las plantas y, por lo tanto, un desarrollo floral más adecuado. Este recurso floral es importante para la alimentación del zumbador canelo y otros colibríes durante su migración.

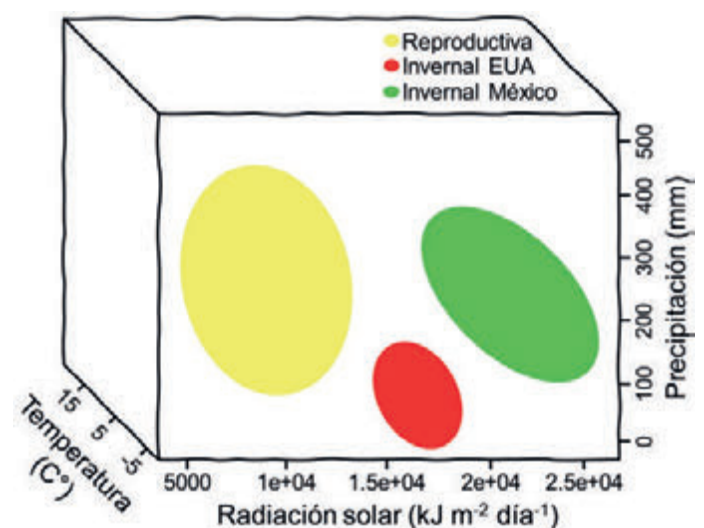


Figura 3. Representación de los nichos climáticos de las áreas reproductiva e invernales del colibrí zumbador canelo. El tamaño de las elipses indica el espacio climático utilizado por la especie. La temperatura representa el calor o energía térmica del aire (expresada en grados Celsius), la precipitación la cantidad de agua que cae del cielo (expresada en milímetros) y la radiación solar indica la energía solar diaria por metro cuadrado de superficie (expresada en kilojulios). Elaboración propia.

El cambio climático y la pérdida de hábitat afectan la fenología de las plantas y, por lo tanto, la conducta migratoria y la distribución geográfica de este colibrí. Esto podría generar que el colibrí adelante su migración, se mueva a nuevas áreas y/o cambie su ruta migratoria. Además, las poblaciones del colibrí zumbador canelo han disminuido en casi 65 % en los últimos 40 años, proceso que se aceleró todavía más a inicios del siglo XXI debido a la pérdida de cobertura forestal (Gillespie et al., 2020; Jefferys et al., 2024). De hecho, debido a estos factores esta especie se encuentra catalogada como “casi amenazada” por la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (IUCN, por sus siglas en inglés). Por lo tanto, es importante estudiar la influencia de las condiciones ambientales en este colibrí migratorio para diseñar estrategias adecuadas para su conservación.

¿CÓMO ESTUDIAR LA INFLUENCIA DEL CLIMA EN LA MIGRACIÓN DEL COLIBRÍ ZUMBADOR CANELO?

Una manera de conocer las condiciones climáticas que requieren las aves migratorias es a partir de herramientas informáticas conocidas como “modelos de nicho ecológico”, que permiten describir las características ambientalmente idóneas que requieren las diferentes especies (Mota-Vargas et al., 2019; Ríos-Muñoz et al., 2021). Para poder reconstruir el nicho ecológico del colibrí zumbador canelo (es decir, para caracterizar las condiciones climáticas que requiere esta

especie migratoria), es necesario obtener información geográfica y ambiental. La información ambiental se refiere a un conjunto de variables ambientales, particularmente climáticas, como temperatura, precipitación y radiación solar, relacionadas con la presencia o distribución de dicha especie. Estas variables climáticas están disponibles gratuitamente en bases digitales como WorldClim (<https://worldclim.org/data/index.html>). Por otro lado, la información geográfica se refiere a registros de presencia de la especie migratoria o sus coordenadas geográficas (latitud y longitud) del sitio donde se observó o colectó a dicha especie. Estos registros se obtienen de trabajo de campo, publicaciones científicas, colecciones biológicas y/o repositorios que almacenan datos de biodiversidad como la Infraestructura Mundial de Información en Biodiversidad (GBIF por sus siglas en inglés; <https://www.gbif.org/es/>). Los registros de presencia también provienen de la importante labor que se compila en plataformas de ciencia ciudadana como Naturalista (<https://mexico.inaturalist.org/>) y eBird (<https://ebird.org/home>), entre otras.

El siguiente paso es asociar los registros de presencia del colibrí zumbador canelo (es decir, sus coordenadas geográficas) con las tres variables climáticas antes mencionadas (temperatura, precipitación y radiación solar) mediante algoritmos computacionales de tipo matemático y estadístico. Estos algoritmos correlacionan los datos geográficos y ambientales para obtener las condiciones climáticas que requiere o necesita este colibrí migratorio (es decir, su nicho ecológico; Fig. 4).

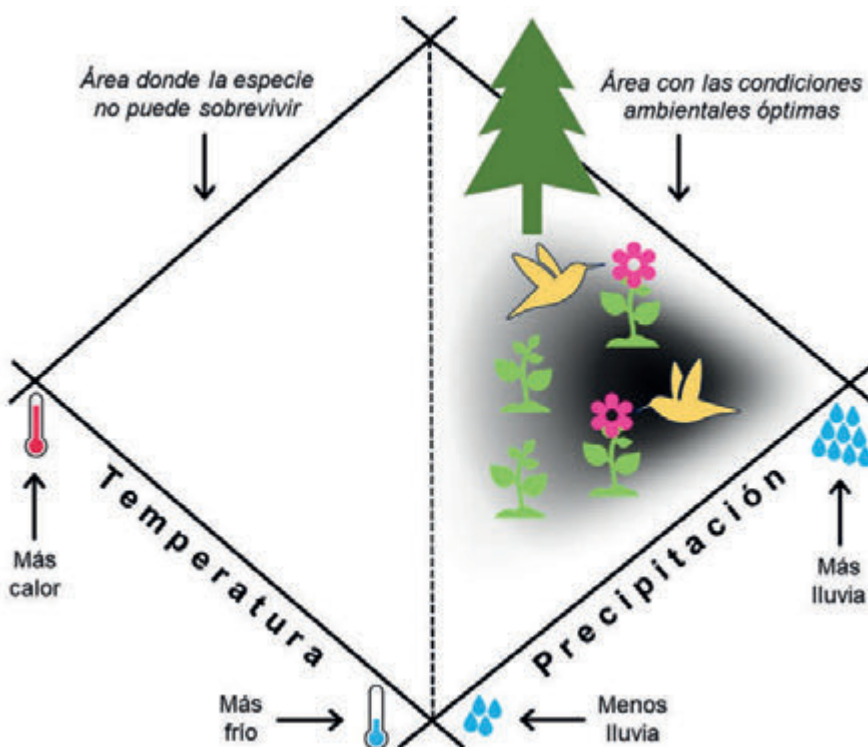


Figura 4. Ejemplo de un nicho ecológico representado por dos variables ambientales. El área sombreada (colores grises) representa las condiciones ambientales óptimas (rango de temperatura y de precipitación) que requiere una especie para sobrevivir. Elaboración propia.

Finalmente, con ayuda de sistemas de información geográfica este nicho ecológico se proyecta en mapas para observar las condiciones climáticas que requiere el colibrí en la geografía, lo que se conoce como distribución geográfica potencial. Por ejemplo, en el área reproductiva el colibrí zumbador canelo se distribuye en gran medida en la parte occidental de EUA y Canadá, y el sur de Alaska (área amarilla de la Fig. 5); mientras que en las áreas invernales, se encuentra principalmente en el sureste-noreste de EUA y sureste de Canadá (área roja), así como en el sur, centro y oeste de México (área verde de la Fig. 5).

CONCLUSIONES

En resumen, el clima influye directa e indirectamente—mediante la fenología de las plantas—en la migración, la distribución geográfica y el nicho ecológico del colibrí zumbador canelo. Documentar esta información es crucial porque el cambio climático y la pérdida de hábitat están alterando el comportamiento migratorio y la distribución de esta especie en su área reproductiva (Canadá y los EUA) y muy probablemente alterando su ciclo migratorio. Es de gran relevancia estudiar las condiciones climáticas para responder preguntas sobre la fisiología, evolución y conservación de los colibríes migratorios.




Figura 5. Mapa de distribución potencial del colibrí zumbador canelo (*Selasphorus rufus*) en sus áreas reproductiva e invernales. Elaboración propia.

Literatura citada



- Alvarez-Alvarez, E.A. R.C. Almazán-Núñez, F.A. Toro-Cardona, L.G.M. Herrera, M.J. Tolsá-García, O. Talavera-Mendoza, M. Lopezaraiza-Mikel. En prensa. Seasonal climatic niche-switching migration in the Nearctic-Neotropical Rufous Hummingbird (*Selasphorus rufus*). *PloSONE*. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0334958>
- Gillespie, C.R., S. Contreras-Martínez, C.A Bishop, J.D. Alexander. 2020. *State of the Rufous Hummingbird science and conservation*. Western Hummingbird Partnership, Colorado, 23 pp.
- Haest, B., O. Hüppop, F. Bairlein. 2018. The influence of weather on avian spring migration phenology: What, where and when? *Global Change Biology*. 24(12): 5769–5788. <https://doi.org/10.1111/gcb.14450>
- Healy, S. y W.A. Calder. 2020. Rufous Hummingbird (*Selasphorus rufus*). En: AF Poole, (Ed.) *Birds of the World (Version 1.0)*. Cornell Lab of Ornithology. <https://doi.org/10.2173/bow.rufhum.01> (consultado el 20/07/2025).
- Hernández-Hernández, N., C. Mota-Vargas, C. Lara, O. Rojas-Soto. 2022. Seasonal distribution of the Broad-Tailed Hummingbird (*Selasphorus platycercus*): a climatic approach. *Zoological Studies*. 61: 23. <https://doi.org/10.6620/ZS.2022.61-23>
- Jefferys, K.M., M.G. Betts, W.D. Robinson, J.R.F. Curtis, T.A. Hallman, A.C. Smith, C. Strevens, J. Aguirre-Gutiérrez. 2024. Breeding habitat loss linked to declines in Rufous Hummingbirds. *Avian Conservation and Ecology*. 19(2): 2. <https://doi.org/10.5751/ACE-02681-190202>
- Mota-Vargas, C., A. Encarnación-Luévano, H.M. Ortega-Andrade, D.A. Prieto-Torres, A. Peña-Peniche, O.R. Rojas-Soto. 2019. *Una breve introducción a los modelos de nicho ecológico*. Pp. 39–63. En: Moreno C.E. (Ed.). *La biodiversidad en un mundo cambiante: Fundamentos teóricos y metodológicos para su estudio*. Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo/Libermex, Ciudad de México, 383 pp.
- Nemes, C.E., S.A. Cabrera-Cruz, M.J. Anderson, L.W. DeGroot, J.G. DeSimone, M.L. Massa, E.B. Cohen. 2023. More than mortality: Consequences of human activity on migrating birds extend beyond direct mortality. *Ornithological Applications*. 125(3): duad020. <https://doi.org/10.1093/ornithapp/duad020>
- Ríos-Muñoz, C.A., M. Vega-Flores, K.M. Vega-Flores, S. Hernández-Rubio, D.V. Espinosa-Martínez. 2021. Del concepto a su aplicación: el proceso del modelado de nichos ecológicos y sus algoritmos. *Revista Latinoamericana de Herpetología*. 04(01): 11–25.
- Rushing, C.S., J.A. Royle, D.J. Ziolkowski Jr., K.L. Pardieck. 2020. Migratory behavior and winter geography drive differential range shifts of eastern birds in response to recent climate change. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 117(23): 12897–12903. <https://doi.org/10.1073/pnas.200029911>
- Somveille, M., A.S.L. Rodrigues, A. Manica. 2015. Why do birds migrate? A macroecological perspective. *Global Ecology and Biogeography*. 24(6): 664–674. <https://doi.org/10.1111/geb.12298>
- Schondube, J.E., S. Contreras-Martínez, I. Ruan-Tejeda, W.A. Calder, E.C. Santana. 2004. *Migratory patterns of the Rufous Hummingbird in western Mexico*. Pp. 80–95. En: Nabhan G.P. (Ed.). *Conserving migratory pollinators and nectar corridors in Western North America*. University of Arizona Press, Arizona, 191 pp.
- Supp, S.R., F.A. La Sorte, T.A. Cormier, M.C.W. Lim, D.R. Powers, S.M. Wethington, S. Goetz, C.H. Graham. 2015. Citizen-science data provides new insight into annual and seasonal variation in migration patterns. *Ecosphere*. 6(1): 15. <https://doi.org/10.1890/ES14-00290.1>
- Thorup, K., A.P. Tøttrup, M. Willemoes, R.H.G. Klaassen, R. Strandberg, M.L. Vega, H.P. Dasari, M.B. Araújo, M. Wikelski, C. Rahbek. 2017. Resource tracking within and across continents in long-distance bird migrants. *Sciences Advances*. 3(1): e1601360. <https://doi.org/10.1126/sciadv.1601360>



PALEOAMBIENTES EN LA PENÍNSULA DE YUCATÁN: HISTORIA CLIMÁTICA Y PALEOECOLÓGICA

/// ARAGÓN-MORENO, ALEJANDRO ANTONIO^{1*} &
ISLEBE, GERALD ALEXANDER¹

¹El Colegio de la Frontera Sur, Unidad Chetumal, Avenida Centenario km 5.5, Chetumal, Quintana Roo CP 77014, Mexico
Correspondencia: alejandro.aragon@ecosur.mx



Palabras clave: Cambio climático, Holoceno, Cultura Maya, Sequías extremas, ENSO, Interacción humano-ambiente.

RESUMEN

La Península de Yucatán ha experimentado transformaciones climáticas y ecológicas significativas a lo largo de su historia geológica. Durante el Pleistoceno, los ciclos orbitales, variaciones en la temperatura, el nivel del mar y la disponibilidad de agua. Tipos de vegetación adaptada a condiciones áridas, como sabanas y matorrales, predominaron el paisaje hasta el inicio del Holoceno, donde el aumento de la temperatura global permitió la reexpansión de las selvas tropicales y el desarrollo de ecosistemas acuáticos. A lo largo del Holoceno, la dinámica climática estuvo influenciada por forzamientos globales como la Zona de Convergencia Intertropical (ITCZ) y la Oscilación del Sur de El Niño (ENSO), que afectaron los patrones de precipitación y disponibilidad de agua. Durante el Holoceno temprano, condiciones óptimas favorecieron la estabilidad ecológica, mientras que el Holoceno medio estuvo marcado por una tendencia hacia la aridificación y la fragmentación de las selvas. En el Holoceno tardío, la variabilidad climática se intensificó, con eventos alternados de sequías y precipitaciones extremas que impactaron tanto los ecosistemas como las sociedades humanas, incluyendo la civilización maya. Eventos climáticos recientes, como el Período Cálido Medieval y la Pequeña Edad de Hielo, también influyeron en la hidrología y biodiversidad de la región. El estudio de estos cambios a través del registro fósil permite comprender mejor la relación entre el clima, la vegetación y la actividad humana, proporcionando información clave para la gestión de los ecosistemas en un contexto de cambio climático actual.





Figura 1. Sabanas de *Pinus caribaea* al Norte de Belice, relicto de vegetación y análogo moderno de vegetación durante el Pleistoceno tardío. Dominada por matorrales y pastos, baja productividad y suelos pobres. Tomada por los Autores

INTRODUCCIÓN

La península de Yucatán, localizada en el sureste de México, se caracteriza por un paisaje geológico y ecológico único, moldeado por su naturaleza kárstica y su hidrología particular. A diferencia de otras regiones del país, donde predominan los ríos y lagos superficiales, esta región destaca por la ausencia casi total de éstos. Esto se debe a que su subsuelo se compone predominantemente de roca caliza, altamente permeable, que permite la infiltración rápida del agua y da lugar a un complejo sistema de acuíferos, cenotes y ríos subterráneos (Bauer-Gottwein et al. 2011). Estos sistemas hídricos desempeñan un papel crucial en el establecimiento, desarrollo y mantenimiento de los ecosistemas circundantes, incluyendo los manglares, selvas, humedales y arrecifes de coral (Hernández-Arana et al. 2015). A lo largo de las siguientes páginas, abordaremos algunos aspectos climáticos y ecológicos que durante los últimos miles de años han moldeado los ecosistemas presentes actualmente en la Península, mediante el estudio del registro fósil obtenidos a lo largo del territorio que permiten reconstruir las variaciones climáticas a través del tiempo, así como el efecto de los cambios ambientales y las actividades humanas sobre los ecosistemas.

CONTEXTO GEOLÓGICO: PLEISTOCENO

Si nos remontamos a la historia de la evolución del clima y los ecosistemas que conocemos en la actualidad, debemos referirnos al desarrollo de la última era geológica. Es decir,

durante los últimos 2.6 Millones de años que comprenden el Cuaternario. Dentro de esta era se encuentra el Pleistoceno, que abarca la primera parte del Cuaternario hasta hace 11,700 años antes del presente (AP). Durante esta época, las variaciones en la órbita terrestre descritas por los ciclos de Milankovitch marcaron profundos cambios climáticos sobre la vida en la Tierra a través de la alternancia de periodos glaciares (Berger and Loutre 2007). La temperatura media global durante los periodos glaciares fue más baja y la cobertura de los casquetes polares fue mucho más extensa que en la actualidad. En consecuencia, el nivel del mar era alrededor de 120 metros por debajo del nivel actual, exponiendo amplias extensiones de plataforma continental y modificando los hábitats costeros (Peltier and Fairbanks 2006). Estas fluctuaciones también afectaron la disponibilidad de agua dulce en la Península de Yucatán, afectando los sistemas de cenotes y acuíferos debido a la reducción del nivel del mar (Bauer-Gottwein et al. 2011) y tiempos de condiciones sumamente áridas (Metcalf et al. 2000). Este periodo fue un motor clave para la evolución de la vida, donde los cambios ambientales promovieron los procesos evolutivos y de adaptación a nuevos ambientes. La vegetación estuvo profundamente influenciada por el clima glacial, promoviendo la expansión de vegetación adaptada a condiciones áridas como matorrales y sabanas, acompañadas de algunas especies de gramíneas y otras herbáceas (Lozano-García et al. 2013) (Figura 1). Durante el Pleistoceno medio y tardío aparecen los primeros homínidos del género *Homo*, así como el inicio de las primeras migraciones, adaptaciones culturales, desarrollo de herramientas y estrategias de caza como respuesta a los cambios ambientales (Klein 2009).

Hace aproximadamente 19,000 años, inició el último proceso de deglaciación con un calentamiento progresivo del clima global debido a los cambios en la radiación solar y un aumento en la concentración de gases de efecto invernadero. Se caracterizó por la desaparición progresiva de las capas de hielo continentales y un aumento rápido del nivel del mar (Clark et al. 2002). Ecosistemas como los manglares y las marismas costeras comenzaron a desarrollarse en las nuevas llanuras inundadas desde distintos refugios ecológicos a lo largo del Pleistoceno (Aburto-Oropeza et al. 2021). Entre 12,900 y 11,700 AP, un evento de enfriamiento global, conocido como Younger Dryas, interrumpió el calentamiento progresivo y estuvo asociado a cambios en la circulación oceánica por las descargas masivas de agua dulce derivada del retroceso de los casquetes polares (Broecker 2006). En la península de Yucatán se observa una reducción en la precipitación y un aumento en la aridez durante este periodo (Hodell et al. 2008). Estos cambios climáticos afectaron la vegetación, favoreciendo una transición temporal hacia comunidades más xerofíticas y reduciendo la disponibilidad de agua dulce en los acuíferos kársticos.

HISTORIA PALEOECOLÓGICA Y PALEOCLIMÁTICA EN LA PENÍNSULA DE YUCATÁN DURANTE EL HOLOCENO

El término del Younger Dryas marcó el inicio de la era posglacial conocido como Holoceno, un periodo caracterizado por un rápido aumento en las temperaturas globales, estabilización climática relativa, expansión de selvas y establecimiento de los ecosistemas acuáticos y costeros (Rull 2007; Khan et al. 2017). Este cambio aceleró la desaparición de los remanentes de hielo continental, aumento continuo del nivel del mar y la configuración de las costas modernas (Khan et al. 2017). En la península de Yucatán, los registros polínicos y geoquímicos de cenotes y lagos muestran una transición hacia un clima más cálido y húmedo, favoreciendo la re-expansión de selvas tropicales y el establecimiento de ecosistemas acuáticos en la región (Hodell et al. 2008), como la cuenca del Río Hondo, Laguna Chichancanab y Laguna Bacalar.

Este periodo estuvo marcado por un aumento en la disponibilidad de recursos hídricos, lo que facilitó el desarrollo de civilizaciones tempranas en Mesoamérica (González et al. 2013). Los estudios paleoecológicos en la península de Yucatán han proporcionado una ventana clave para comprender la dinámica climática y ecológica del pasado, así como su impacto en los ecosistemas y las sociedades humanas, ya que esta región, debido a su ubicación entre la zona subtropical y tropical, muestra

una alta sensibilidad a los cambios en los forzamientos climáticos globales y regionales (Haug et al. 2001). La importancia de estos forzamientos climáticos radica en su capacidad para generar fluctuaciones climáticas a escalas temporales que abarcan desde décadas hasta milenios, dejando huellas tangibles en los sedimentos lacustres, los registros polínicos y la química de los cuerpos de agua. En sitios emblemáticos como la Laguna de Bacalar, la Laguna Chichancanab y el Río Hondo, los registros paleoecológicos han revelado cómo los cambios en la posición de la Zona de Convergencia Intertropical (ITCZ, por sus siglas en inglés) y la intensidad de El Niño-Oscilación del Sur (ENSO) han influido en la disponibilidad de agua, la estructura de los ecosistemas y la biodiversidad regional. Estos registros no solo documentan periodos de sequía severa asociados con eventos de El Niño (Oster et al. 2019), sino también momentos de alta recarga hídrica vinculados a variaciones en la actividad ENSO, evidenciando la interacción entre estos forzamientos y su impacto combinado en la región. Sin embargo, dada la complejidad de la interacción entre forzamientos climáticos, las variaciones espacio-temporales de respuesta ecológica y la baja disponibilidad de sitios con potencial de registros paleoecológicos en la península de Yucatán, hacen que el desarrollo de una historia climática y paleoecológica integral sea, hasta el momento, una tarea sumamente compleja.

HOLOCENO TEMPRANO: GREENLANDIENSE (11,700 - 8,200 AÑOS AP)

El Holoceno comenzó con un cambio drástico del clima frío y seco del Pleistoceno tardío a condiciones más cálidas y húmedas hacia hace alrededor de 11,700 años. Se caracteriza por el calentamiento global y el consiguiente retroceso de las grandes capas de hielo que trajo consigo un aumento significativo en los niveles del mar, cambios en los patrones de precipitación y una transformación en la distribución de la vegetación (Walker et al. 2009). En la península de Yucatán, estos procesos globales se manifestaron de manera única, moldeando el desarrollo de ecosistemas tropicales y la disponibilidad de recursos hídricos en un entorno dominado por sistemas kársticos (Hodell et al. 1995). Este cambio marcó el inicio de un periodo de estabilidad climática relativa conocido como el Óptimo Climático del Holoceno, caracterizado por temperaturas elevadas y una mayor disponibilidad de agua en la región (Metcalfe et al. 2000). Durante este tiempo, entre 9,000 y 5,000 años antes del presente (AP), los niveles del mar Caribe se elevaron rápidamente, inundando sistemas kársticos y creando nuevos ecosistemas acuáticos, como cenotes y lagunas costeras (Perry et al. 2009). El desarrollo y expansión de las selvas también ocurrió durante este

mismo periodo por las condiciones hídricas y térmicas favorables (Islebe et al. 2015). Sin embargo, la relativa estabilidad climática presentó diversos episodios de cambios ambientales dirigidos por dos factores climáticos como la variación de la ITCZ (Haug et al. 2001; Aragón-Moreno et al. 2018a) y el ENSO (Aragón-Moreno et al. 2018a; Warken et al. 2021). Estos sistemas han influido en la distribución de las precipitaciones, la intensidad de las sequías y la disponibilidad de agua, factores que han afectado tanto los ecosistemas como las sociedades humanas (Islebe et al. 2022).

La ITCZ es una banda de convergencia atmosférica que se forma cerca del ecuador debido al encuentro de los vientos alisios del hemisferio norte y sur. Esta zona se caracteriza por una alta actividad convectiva y precipitaciones intensas, siendo un determinante clave del clima tropical. Durante el Holoceno, la posición de la ITCZ varió significativamente en respuesta a factores como la precesión orbital y cambios en la radiación solar (Curtis et al. 1998; Haug et al. 2001). Por otra parte, el fenómeno de ENSO ha sido un modulador clave del clima global. Es un fenómeno océano-atmosférico que se desarrolla en la porción oeste del Océano Pacífico y que influye sobre los patrones de precipitación, temperatura y dinámica ecológica en distintas escalas espacio-temporales (Clement et al. 2000) (Figura 2).

Durante el Holoceno temprano (entre 11,700 a 8,200 AP), la ITCZ estaba desplazada hacia el norte debido a una mayor radiación solar en el hemisferio norte (Haug et al. 2001). Este desplazamiento generó un

clima más húmedo en la Península de Yucatán, promoviendo la expansión de las selvas y el desarrollo de cuerpos de agua permanentes (Curtis et al. 1998). En la Península de Yucatán, sus efectos han sido particularmente complejos debido a su interacción con otros forzamientos climáticos regionales como el ENSO y la Oscilación del Atlántico Norte (NAO), aunque la influencia de estos últimos, durante la mayor parte del Holoceno temprano fue menor por la mayor influencia de la ITCZ en la región, disminuyendo la sensibilidad de los ecosistemas a las variaciones de otros forzamientos climáticos regionales (Koutavas and Joanides 2012).

El aumento de la temperatura global a lo largo del Holoceno temprano, asociada a la posición de la Tierra y la incidencia de la radiación solar en el Hemisferio norte, ocasionaron un evento climático en escala global con fuertes repercusiones ambientales. Hacia 8,200 AP la liberación masiva de agua dulce al Atlántico Norte derivada del derretimiento continuo de los casquetes polares, alteró significativamente las corrientes oceánicas reguladoras de la temperatura oceánica. Esto resultó en un enfriamiento global de entre 1 y 3 °C y en patrones de precipitación modificados en diversas partes del mundo (Alley et al. 1997). Los cambios climáticos provocaron un desplazamiento de la ITCZ hacia el sur (Haug et al. 2001), lo que resultó en una disminución significativa de las precipitaciones en la Península de Yucatán. Los niveles de agua de los cuerpos permanentes como la Laguna Chichancanab se redujeron abruptamente (Hodell et al. 1995)

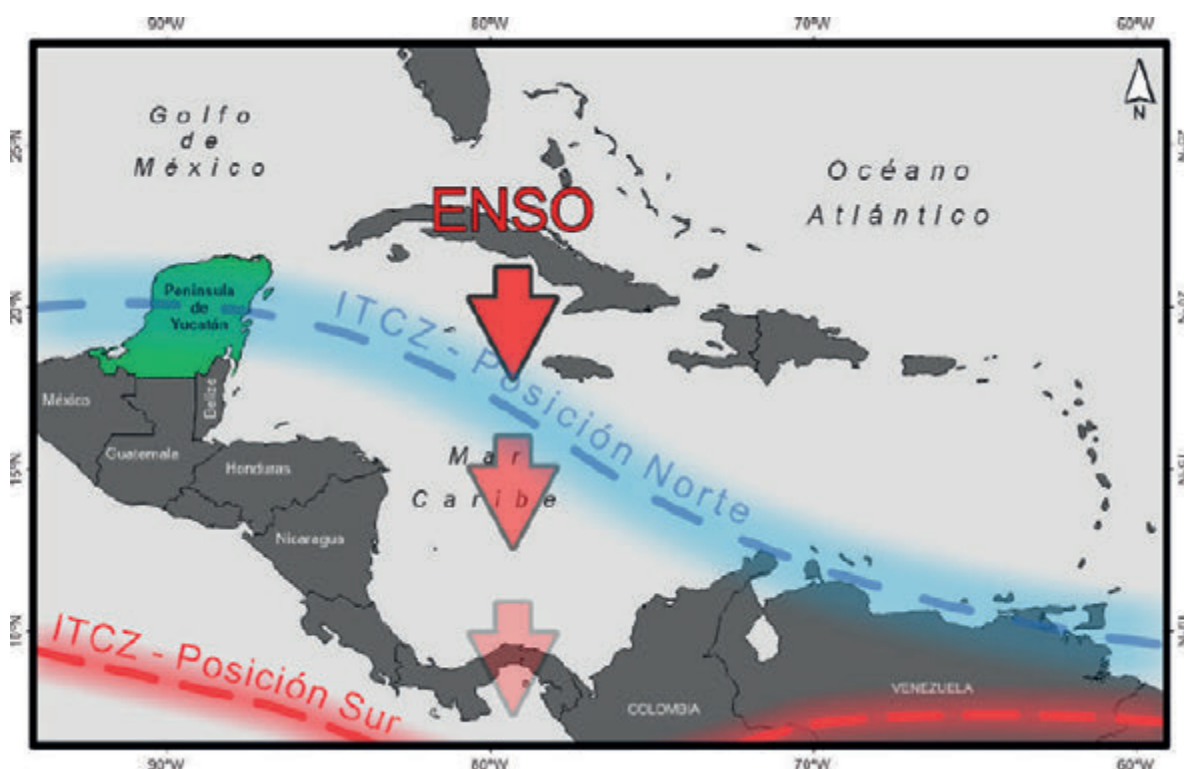


Figura 2. Representación de la posición media de la Zona de Convergencia Intertropical (ITCZ) y el efecto ENSO en la península de Yucatán.

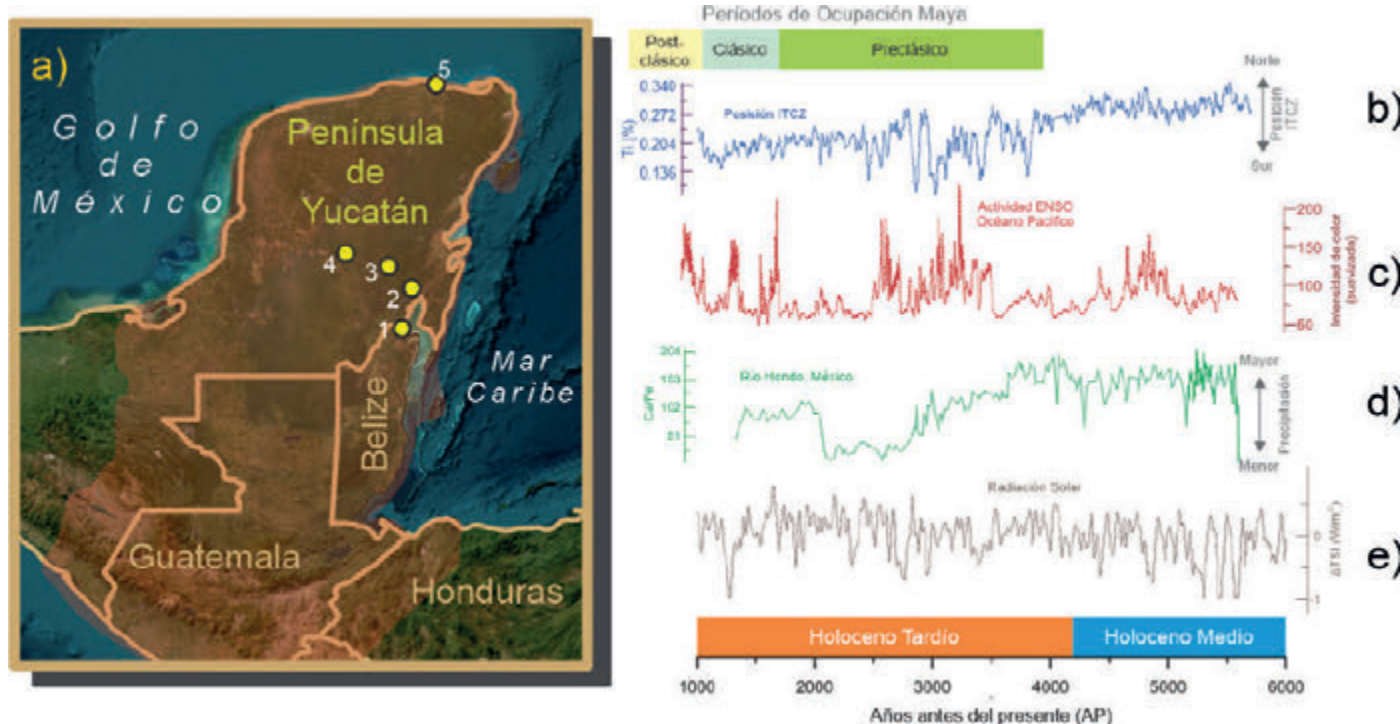


Figura 3. a) Localización de algunos estudios paleoecológicos y paleoclimáticos realizados en la península (1. Río Hondo, 2. Laguna de Bacalar, 3. Laguna Dzib, 4. Laguna Chichancanab, 5) Ría Lagartos); b) Indicador de la posición de la ITCZ; c) Actividad ENSO; d) Escorrentía Río Hondo; e) Actividad Solar. Barras que muestran los Periodos de ocupación Maya (arriba) y Periodos de mayor cambio paleoclimático y paleoecológico durante el Holoceno (abajo)

HOLOCENO MEDIO: NORTHGRIPIENSE (8,200 - 4,200 AÑOS AP)

El evento de 8,200 AP marcó el final del Holoceno temprano e inicio del Holoceno medio. A partir de este periodo se observa una tendencia general hacia una mayor aridificación, atribuida a la reducción de la insolación en el hemisferio norte y la disminución progresiva del monzón mesoamericano, afectando la estructura y composición de los ecosistemas. La ITCZ continuó su desplazamiento hacia el sur (Haug et al. 2001), lo que restringió aún más la influencia de las precipitaciones monzónicas sobre la península. Paralelamente, el ENSO, que había permanecido relativamente débil durante el Holoceno temprano, comenzó a intensificarse (Moy et al. 2002), aumentando la variabilidad climática, generando periodos alternos de sequías y lluvias intensas (Aragón-Moreno et al. 2018a) y exacerbando la aridez en ciertos momentos del Holoceno medio (Carrillo-Bastos et al. 2010) (Figura 3). La variabilidad climática afectó los niveles de agua y salinidad en lagos y cenotes (Hodell et al. 1995; Aragón-Moreno et al. 2024), y con cambios en la vegetación detectados mediante el aumento de especies tolerantes a la sequía y una disminución en la cobertura de selvas tropicales (Aragón-Moreno et al. 2018a). Se observa una transición progresiva desde un paisaje dominado por selvas en el Holoceno temprano hacia un mosaico de selvas secas y sabanas abiertas en el Holoceno medio (Islebe et al. 2019). Los sistemas de manglar y las

selvas mostraron periodos de alternancia entre especies con distintos grados de tolerancia a periodos de aridez e incrementos de precipitación en respuesta a las variaciones en la posición de la ITCZ y la actividad ENSO (Aragón-Moreno et al. 2018b). Alrededor de 4,200 AP se observó un periodo de inestabilidad climática que marcó el final del Holoceno medio. Sin embargo, aunque ha sido utilizado como un marcador estratigráfico, los datos paleoclimáticos y paleoecológicos son inconsistentes (McKay et al. 2024; Helama 2024). En la península de Yucatán, este evento ha sido documentado a través de registros paleoambientales que sugieren una disminución de la precipitación y cambios en los ecosistemas acuáticos y terrestres con una estructura y composición más afín a condiciones de mayor aridez (Aragón-Moreno et al. 2018a).

HOLOCENO TARDÍO: MEGHALAYENSE (4,200 AÑOS AP - PRESENTE)

El Holoceno tardío en la Península de Yucatán estuvo marcado por una mayor variabilidad climática y la ocurrencia de eventos secos y húmedos alternados (Haug et al. 2001; Haug et al. 2003). Durante este periodo, la ITCZ alcanzó una posición similar a la actual, con fluctuaciones moduladas por el ENSO y cambios en la actividad solar (Bernal et al. 2011; Aragón-Moreno et al. 2018a). Estos cambios tuvieron impactos profundos en la disponibilidad de recursos hídricos, dinámica de ecosistemas costeros (Aragón-

Moreno et al. 2018b) y favorecieron la formación e impacto de huracanes (Tang and Neelin 2004; McCloskey and Liu 2012). Al inicio del Holoceno tardío se observa una transición del paisaje con el cambio de selvas dominadas por especies perennifolias a un mosaico de diversos tipos de selvas subperennifolias y subcaducifolias ante condiciones de menor precipitación (Aragón-Moreno et al. 2018a).

Entre 3,900 y 2,100 AP hubo un incremento de especies asociadas a ambientes perturbados y aparece el maíz (*Zea mays*) de manera consistente, dando evidencia de actividad agrícola temprana de los pobladores mayas (Islebe et al. 2022). Probablemente, los cambios en los regímenes de precipitación favorecieron el desarrollo de la agricultura durante este tiempo (Torrescano-Valle and Islebe 2015). En este periodo, alrededor de 2,600 AP, se registran los niveles más bajos de cobertura de selvas y una reducción en el transporte de sedimentos a las cuencas y ecosistemas costeros asociados a un período de sequía extrema (Aragón-Moreno et al. 2018a) y eventos de tormentas intensas (Roy et al. 2017). Este evento de sequía coincide con el mínimo solar de 2800 AP a nivel global. Sin embargo, entre 2,100 y 1,100 AP, se observa un retorno a condiciones más húmedas, permitiendo la expansión de las selvas (Aragón-Moreno et al. 2012; Torrescano-Valle and Islebe 2015) y sistemas de manglar (Aragón-Moreno et al. 2018b). Las actividades humanas fueron evidentes en el registro fósil, donde la antigua cultura Maya alcanzó su mayor auge en lo que se denomina el Periodo Clásico Maya. Este es un periodo que ha sido ampliamente estudiado desde distintas áreas del conocimiento debido al desarrollo de la agricultura y la construcción de grandes centros ceremoniales (Dunning et al. 2012), así como a la evidencia de la relación temprana humano-ambiente (Kennett and Beach 2013). Este patrón de condiciones favorables para el desarrollo de las selvas y las sociedades mayas se vio interrumpido por un periodo de sequías prolongadas entre 1,200 y 825 AP, coincidentes con el colapso del Período Clásico Terminal Maya. Los datos paleoecológicos y paleoclimáticos durante este periodo presentan distintas discrepancias cronológicas, aunque la señal paleoclimática fue la misma; sequías prolongadas multianuales y un fuerte efecto en la composición de la vegetación (Hodell et al. 2007; Medina-Elizalde and Rohling 2012; Kennett et al. 2012; Douglas et al. 2015).

Durante los últimos mil años, la Península de Yucatán ha experimentado un proceso progresivo de reducción de la precipitación (Haug et al. 2003). Sin embargo, los registros paleoclimáticos muestran anomalías climáticas significativas. La primera de ellas, denominada Período Cálido Medieval, ocurrió entre 1050 y 650 AP. Fue una fase de temperaturas inusualmente cálidas a nivel global y variaciones en los patrones de precipitación en la península de Yucatán (Hodell et al. 1995; Medina-Elizalde et al. 2010). Durante este intervalo se registraron cambios climáticos significativos asociados a

una fuerte variación en la actividad ENSO con repercusiones en la posición de la ITCZ (Lachniet et al. 2004). La segunda, denominada Pequeña Edad de Hielo, comprende de 600 a ~100 AP, donde la península de Yucatán experimentó una mayor precipitación invernal que favoreció la expansión de las selvas y el nivel de los cuerpos de agua. Estos cambios han sido asociados de mínima radiación solar que favorecieron la posición de la ITCZ hacia el norte (Haug et al. 2001; Lozano-García et al. 2007).

CULTURA MAYA Y SU RELACIÓN CON EL AMBIENTE

La relación entre la cultura maya y el clima en la península de Yucatán ha sido estudiada a través de registros paleoclimáticos y paleoecológicos como sedimentos lacustres, núcleos de cenotes y espeleotemas. Estos estudios han revelado la fuerte influencia de la variabilidad climática sobre esta cultura (Islebe et al. 2022), particularmente en relación a la disponibilidad de agua en un paisaje caracterizado por la ausencia de ríos superficiales. Durante el Holoceno tardío, la región experimentó fluctuaciones entre períodos húmedos y secos dirigidos por cambios en los sistemas climáticos regionales-globales (Aragón-Moreno et al. 2018a), lo que tuvo un impacto directo en la disponibilidad de recursos hídricos y en la productividad de los ecosistemas. Durante épocas de mayor humedad, la posición norte de la ITCZ permitió la recarga de cenotes y acuíferos, facilitando el acceso al agua y promoviendo el desarrollo de suelos más aptos para la agricultura (Torrescano-Valle and Islebe 2015). En contraste, los períodos de sequía fueron dirigidos por la actividad ENSO y variaciones en la actividad solar, reduciendo significativamente la disponibilidad de agua, intensificaron la aridez del suelo y favorecieron la expansión de ecosistemas resistentes a ambientes de mayor aridez. Esto facilitó la adopción del Maíz no sólo como un cultivo básico en la cultura Maya, sino que formó parte de una estrategia ante tiempos climáticos adversos (Islebe et al. 2018; Islebe et al. 2022). Los registros paleoecológicos muestran cambios en la composición de la vegetación, con evidencias de cambio de uso de suelo en algunos períodos y recuperación en otros, lo que sugiere una estrecha relación entre los cambios climáticos, los procesos ecológicos y las actividades humanas. Estos datos subrayan la sensibilidad del ambiente de la península de Yucatán a los cambios climáticos del Holoceno tardío y la compleja interacción entre la hidrología kárstica y los ecosistemas locales.

AGRADECIMIENTOS

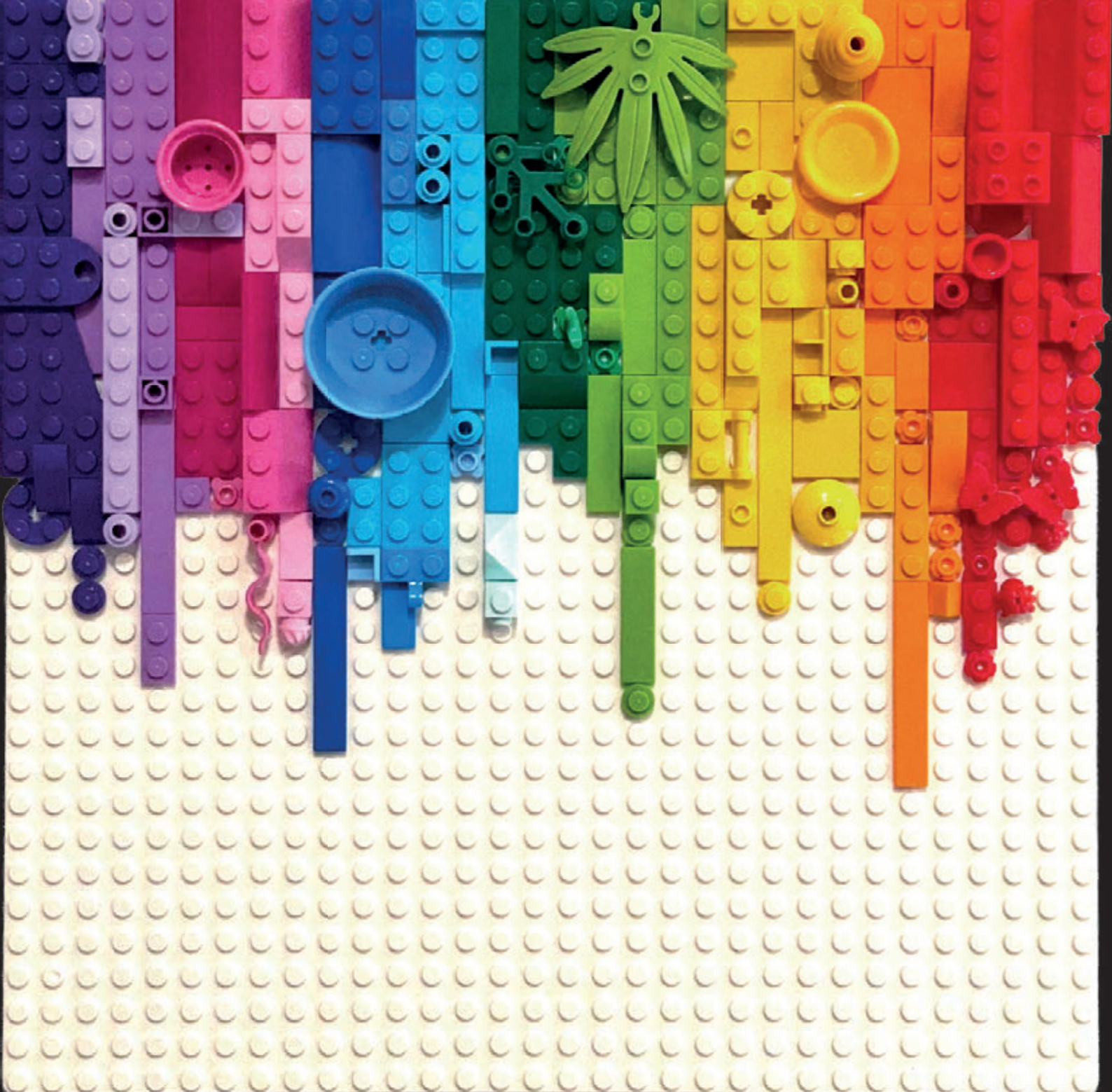
Los autores agradecen a CONAHCYT el apoyo recibido al proyecto de Ciencia de Frontera Las selvas de la península de Yucatán durante el Holoceno Medio y Tardío: una compleja interacción de dinámica y resiliencia.

Literatura citada



- Aburto-Oropeza, O., C.M. Burelo-Ramos, E. Ezcurra, P. Ezcurra, C.L. Henriquez, S.E. Vanderplank, F. Zapata. 2021. Relict inland mangrove ecosystem reveals Last Interglacial sea levels. *Proceedings of the National Academy of Sciences. U.S.A.* 118: e2024518118.
- Alley, R.B., P.A. Mayewski, T. Sowers, M. Stuiver, K.C. Taylor, P.U. Clark. 1997. Holocene climatic instability: A prominent, widespread event 8200 yr ago. *Geology*. 25: 483–486.
- Aragón-Moreno, A.A., G.A. Islebe, P.D. Roy, N. Torrescano-Valle, A.D. Mueller. 2018. Climate forcings on vegetation of the southeastern Yucatán Peninsula (Mexico) during the middle to late Holocene. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*. 495: 214–226.
- Aragón-Moreno, A.A., G.A. Islebe, N. Torrescano-Valle. 2012. A ~3800-yr, high-resolution record of vegetation and climate change on the north coast of the Yucatan Peninsula. *Review of Palaeobotany and Palynology*. 178: 35–42.
- Aragón-Moreno, A.A., G.A. Islebe, N. Torrescano-Valle, J. Arellano-Verdejo. 2018. Middle and late Holocene mangrove dynamics of the Yucatan Peninsula, Mexico. *Journal of South American Earth Sciences*. 85: 307–311.
- Aragón-Moreno, A.A., G.A. Islebe, N. Torrescano-Valle, H.A. Hernández-Arana, A. Carrillo-Bastos, R. Friedel. 2024. Mangrove dynamics driven by Late Holocene drought at Laguna Bacalar, Mexico. *Quaternary Environments and Humans*. 2: 100023.
- Bauer-Gottwein, P., B.R.N. Gondwe, G. Charvet, L.E. Marín, M. Rebolledo-Vieyra, G. Merediz-Alonso. 2011. Review: The Yucatán Peninsula karst aquifer, Mexico. *Hydrogeology Journal*. 19: 507–524.
- Berger, A. & M.-F. Loutre. 2007. Glaciation, causes | Milankovitch theory and paleoclimate, p. 1017–1022. In S.A. Elias (ed.). *Encyclopedia of Quaternary Science*. Elsevier, Oxford.
- Bernal, J.P., M. Lachniet, M. McCulloch, G. Mortimer, P. Morales, E. Cienfuegos. 2011. A speleothem record of Holocene climate variability from southwestern Mexico. *Quaternary Research*. 75: 104–113.
- Broecker, W.S. 2006. *Geology*. Was the Younger Dryas triggered by a flood? *Science*. 312: 1146–1148.
- Carrillo-Bastos, A., G.A. Islebe, N. Torrescano-Valle, N.E. González. 2010. Holocene vegetation and climate history of central Quintana Roo, Yucatán Peninsula, Mexico. *Review of Palaeobotany and Palynology*. 160: 189–196.
- Clark, P.U., J.X. Mitrovica, G.A. Milne, M.E. Tamisiea. 2002. Sea-Level Fingerprinting as a Direct Test for the Source of Global Meltwater Pulse 1A. *Science*. 295: 2438–2441.
- Clement, A.C., R. Seager, M.A. Cane. 2000. Suppression of El Niño during the Mid-Holocene by changes in the Earth's orbit. *Paleoceanography*. 15: 731–737.
- Curtis, J.H., M. Brenner, D.A. Hodell, R.A. Balser, G.A. Islebe, H. Hooghiemstra. 1998. A multi-proxy study of Holocene environmental change in the Maya Lowlands of Peten, Guatemala. *Journal of Paleolimnology*. 19: 139–159.
- Douglas, P.M.J., M. Pagani, M.A. Canuto, M. Brenner, D.A. Hodell, T.I. Eglinton, J.H. Curtis. 2015. Drought, agricultural adaptation, and sociopolitical collapse in the Maya Lowlands. *Proceedings of the National Academy of Sciences. U.S.A.* 112: 5607–5612.
- Dunning, N.P., T.P. Beach, S. Luzzadder-Beach. 2012. Kax and kol: collapse and resilience in lowland Maya civilization. *Proceedings of the National Academy of Sciences. U.S.A.* 109: 3652–3657.
- González, A.H., A. Terrazas, W. Stinnesbeck, M.E. Benavente, J. Avilés, C. Rojas, J.M. Padilla, A. Velásquez, E. Acevez, E. Frey. 2013. The First Human Settlers on the Yucatan Peninsula: Evidence from Drowned Caves in the State of Quintana Roo (South Mexico), p. 323–337. In K. Graf, C. Ketron & M. Waters (eds.). *Paleoamerican Odyssey*. Center for the Study of the First American, Orono.
- Haug, G.H., D. Günther, L.C. Peterson, D.M. Sigman, K.A. Hughen, B. Aeschlimann. 2003. Climate and the collapse of Maya civilization. *Science*. 299: 1731–1735.
- Haug, G.H., K.A. Hughen, D.M. Sigman, L.C. Peterson, U. Röhl. 2001. Southward migration of the intertropical convergence zone through the Holocene. *Science*. 293: 1304–1308.
- Helama, S. 2024. The 4.2 ka event: A review of palaeoclimate literature and directions for future research. *The Holocene*. 34: 1408–1415.
- Hernández-Arana, H.A., A. Vega-Zepeda, M.A. Ruíz-Zárate, L.I. Falcón-Álvarez, H. López-Adame, J. Herrera-Silveira, J. Kaster. 2015. Transverse Coastal Corridor: From Freshwater Lakes to Coral Reefs Ecosystems, p. 355–376. In G.A. Islebe, S. Calmé, J.L. León-Cortés & B. Schmook (eds.). *Biodiversity and Conservation of the Yucatán Peninsula*. Springer International Publishing, Cham.
- Hodell, D.A., F.S. Anselmetti, D. Ariztegui, M. Brenner, J.H. Curtis, A. Gilli, D.A. Grzesik, T.J. Guilderson, A.D. Müller, M.B. Bush, A. Correa-Metrio, J. Escobar, S. Kutterolf. 2008. An 85-ka record of climate change in lowland Central America. *Quaternary Science Reviews*. 27: 1152–1165.
- Hodell, D.A., M. Brenner, J.H. Curtis. 2007. Climate and cultural history of the Northeastern Yucatan Peninsula, Quintana Roo, Mexico. *Climate Change*. 83: 215–240.
- Hodell, D.A., J.H. Curtis, M. Brenner. 1995. Possible role of climate in the collapse of Classic Maya civilization. *Nature*. 375: 391–394.
- Islebe, G.A., A. Carrillo-Bastos, A.A. Aragón-Moreno, M. Valdez-Hernández, N. Torrescano-Valle, N. Cabanillas-Terán. 2019. Holocene Paleoclimatology and Paleoclimatology of south and south-eastern Mexico: a palynological and geospatial approach, p. 195–208. In N. Torrescano-Valle, G.A. Islebe, P. Roy (eds.). *The Holocene and Anthropocene Environmental History of Mexico: A Paleocological Approach on Mesoamerica*. Springer, Switzerland.
- Islebe, G.A., O. Sánchez-Sánchez, M. Valdéz-Hernández, H. Weissenberger. 2015. Distribution of Vegetation Types, p. 39–53. In G.A. Islebe, S. Calmé, J.L. León-Cortés, B. Schmook (eds.). *Biodiversity and Conservation of the Yucatán Peninsula*. Springer International Publishing.
- Islebe, G.A., N. Torrescano-Valle, A.A. Aragón-Moreno, A.A. Vela-Peláez, M. Valdez-Hernández. 2018. The Paleoanthropocene of the Yucatán Peninsula: palynological evidence of environmental change. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 70: 49–60.
- Islebe, G.A., N. Torrescano-Valle, M. Valdez-Hernández, A. Carrillo-Bastos, A.A. Aragón-Moreno. 2022. Maize and ancient Maya droughts. *Scientific Reports*. 12: 22272.

- Kennett, D.J. & T.P. Beach. 2013. Archeological and environmental lessons for the Anthropocene from the Classic Maya collapse. *Anthropocene*. 4: 88–100.
- Kennett, D.J., S.F.M. Breitenbach, V.V. Aquino, Y. Asmerom, J. Awe, J.U.L. Baldini, P. Bartlein, B.J. Culleton, C. Ebert, C. Jazwa, M.J. Macri, N. Marwan, V. Polyak, K.M. Prufer, H.E. Ridley, H. Sodemann, B. Winterhalder, G.H. Haug. 2012. Development and disintegration of Maya political systems in response to climate change. *Science*. 338: 788–791.
- Khan, N.S., E. Ashe, B.P. Horton, A. Dutton, R.E. Kopp. 2017. Drivers of Holocene sea-level change in the Caribbean. *Quaternary Science Reviews*. 155: 13–36.
- Klein, R.G. 2009. *The Human Career: Human biological and cultural origins*. University of Chicago Press, Chicago, IL.
- Koutavas, A. & S. Joanides. 2012. El Niño-southern oscillation extrema in the Holocene and last glacial maximum: Enso extrema in the Holocene and Last Glacial Maximum. *Paleoceanography*. 27.
- Lachniet, M.S., S.J. Burns, D.R. Piperno. 2004. A 1500-year El Niño/Southern Oscillation and rainfall history for the Isthmus of Panama from speleothem calcite. *Journal of Geophysical Research*. 109: D20117.
- Lozano-García, M. d. S., M. Caballero, B. Ortega, A. Rodriguez, S. Sosa. 2007. Tracing the effects of the Little Ice Age in the tropical lowlands of eastern Mesoamerica. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 104: 16200–16203.
- Lozano-García, S., E. Torres-Rodríguez, B. Ortega, G. Vázquez, M. Caballero. 2013. Ecosystem responses to climate and disturbances in western central Mexico during the late Pleistocene and Holocene. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*. 370: 184–195.
- McCloskey, T.A. & K.-B. Liu. 2012. A 7000 year record of paleohurricane activity from a coastal wetland in Belize. *The Holocene*. 23: 278–291.
- McKay, N.P., D.S. Kaufman, S.H. Arcusa, H.R. Kolus, D.C. Edge, M.P. Erb, C.L. Hancock, C.C. Routson, M. Żarczyński, L.P. Marshall, G.K. Roberts, F. Telles. 2024. The 4.2 ka event is not remarkable in the context of Holocene climate variability. *Nature Communications*. 15: 6555.
- Medina-Elizalde, M., S.J. Burns, D.W. Lea, Y. Asmerom, L. von Gunten, V. Polyak, M. Vuille, A. Karmalkar. 2010. High resolution stalagmite climate record from the Yucatán Peninsula spanning the Maya terminal classic period. *Earth and Planetary Science Letters*. 298: 255–262.
- Medina-Elizalde, M. & E.J. Rohling. 2012. Collapse of Classic Maya civilization related to modest reduction in precipitation. *Science*. 335: 956–959.
- Metcalfe, S.E., S.L. O'Hara, M. Caballero, S.J. Davies. 2000. Records of Late Pleistocene–Holocene climatic change in Mexico — a review. *Quaternary Science Reviews*. 19: 699–721.
- Moy, C.M., G.O. Seltzer, D.T. Rodbell, D.M. Anderson. 2002. Variability of El Niño/Southern Oscillation activity at millennial timescales during the Holocene epoch. *Nature*. 420: 162–165.
- Oster, J.L., S.F. Warken, N. Sekhon, M.M. Arienzo, M. Lachniet. 2019. Speleothem Paleoclimatology for the Caribbean, Central America, and North America. *Quaternary*. 2: 5.
- Peltier, W.R. & R.G. Fairbanks. 2006. Global glacial ice volume and Last Glacial Maximum duration from an extended Barbados sea level record. *Quaternary Science Reviews*. 25: 3322–3337.
- Perry, E., A. Paytan, B. Pedersen, G. Velazquez-Oliman. 2009. Groundwater geochemistry of the Yucatan Peninsula, Mexico: Constraints on stratigraphy and hydrogeology. *Journal of Hydrology*. 367: 27–40.
- Roy, P.D., N. Torresscano-Valle, G.A. Islebe, L.V. Gutiérrez-Ayala. 2017. Late Holocene hydroclimate of the western Yucatan Peninsula (Mexico). *Journal of Quaternary Science*. 32: 1112–1120.
- Rull, V. 2007. Holocene global warming and the origin of the Neotropical Gran Sabana in the Venezuelan Guayana. *Journal of Biogeography*. 34: 279–288.
- Tang, B.H. & J.D. Neelin. 2004. ENSO influence on Atlantic hurricanes via tropospheric warming. *Geophysical Research Letters*. 31: L24204.
- Torresscano-Valle, N. & G.A. Islebe. 2015. Holocene paleoecology, climate history and human influence in the southwestern Yucatán Peninsula. *Review of Palaeobotany and Palynology*. 217: 1–8.
- Walker, M., S. Johnsen, S.O. Rasmussen, T. Popp, J.-P. Steffensen, P. Gibbard, W. Hoek, J. Lowe, J. Andrews, S. Björck, L.C. Cwynar, K. Hughen, P. Kershaw, B. Kromer, T. Litt, D.J. Lowe, T. Nakagawa, R. Newnham, J. Schwander. 2009. Formal definition and dating of the GSSP (Global Stratotype Section and Point) for the base of the Holocene using the Greenland NGRIP ice core, and selected auxiliary records. *Journal of Quaternary Science*. 24: 3–17.
- Warken, S.F., N. Schorndorf, W. Stinnesbeck, D. Hennhoefler, S.R. Stinnesbeck, J. Förstel, S.D. Steidle, J. Avilés Olguin, N. Frank. 2021. Solar forcing of early Holocene droughts on the Yucatán peninsula. *Scientific Reports*. 11: 13885.



¿CÓMO LOGRAR LA CONSOLIDACIÓN DE UNA AGRUPACIÓN ACADÉMICA?

EL CASO DE UN GRUPO ENFOCADO EN LA CONSERVACIÓN BIOLÓGICA

ANA PAOLA MARTÍNEZ-FALCÓN¹, AURELIO RAMÍREZ-BAUTISTA¹, ARTURO SÁNCHEZ-GONZÁLEZ¹, DULCE MARÍA GALVÁN-HERNÁNDEZ¹, PABLO OCTAVIO-AGUILAR¹, RAÚL ORTIZ-PULIDO¹, SYLVIA MARTÍNEZ-HERNÁNDEZ¹

¹Instituto de Ciencias básicas e Ingeniería, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo



Palabras clave:

ciencia, grupo académico, Cuerpos Académicos, formación de recursos humanos.

Key words:

science, research group, Academic body, human resources training.



RESUMEN

Este artículo analiza la trayectoria de un grupo de investigación que, desde su inicio en México bajo el programa PROMEP, se consolidó como Cuerpo Académico (CA). Se presentan datos sobre la formación de estudiantes y publicaciones para explicar la evolución e impacto del Cuerpo Académico en el marco científico de México. Este estudio de caso muestra el éxito de los Cuerpos Académicos en el fortalecimiento de la ciencia en nuestro país.

ABSTRACT

This article analyzes the formation of a research group in Mexico within the PROMEP program until its consolidation as an academic body. Information on student training and publications is presented to explain its evolution and impact on the scientific framework in Mexico. This document demonstrates the success of academic bodies in Mexico using the case of one of them to strengthen science in our country.

INTRODUCCIÓN

Según el Programa de Mejoramiento del Profesorado (PROMEP) de la Secretaría de Educación Pública en México, los Cuerpos Académicos (CA) son grupos formados por personas con actividad de investigación con objetivos comunes, que frecuentemente se encuentran desempeñándose como profesores-investigadores en una institución pública de Gobierno (DOF30/12/2007-PROMEP, 2007). Los integrantes de los CA comparten una o varias líneas de generación y/o aplicación del conocimiento (LGAC). En este contexto, cada CA tiene objetivos claros para su desarrollo y el de sus integrantes, como producción científica conjunta de calidad a nivel nacional e internacional, así como la formación de recursos humanos de excelencia en los tres niveles educativos (licenciatura, maestría y doctorado), y, en algunos casos, generar patentes, implementar programas para la transferencia de conocimiento y herramientas tecnológicas para resolver problemáticas locales, regionales y nacionales. Los CA, al cumplir los objetivos que se plantean, aportan

acciones concretas hacia la misión y visión que marca cada Institución Educativa.

La visión de los CA deriva de las políticas públicas propuestas por las autoridades en educación superior, que a través del PROMEP, que es un programa federal mexicano enfocado en elevar la calidad de la educación superior, establecen las bases de los CA para los tecnológicos y universidades públicas. Los parámetros que debe cubrir un CA en una universidad pública incluyen que los integrantes del mismo tengan metas en común, solidez y madurez en las líneas de investigación (i.e., consolidadas), la generación de conocimiento debe ser realizada de manera colegiada mediante proyectos innovadores y que éstos generen productos, como formación de recursos humanos, artículos indexados y arbitrados, notas científicas y de divulgación, capítulos de libro, libros, patentes, entre otros (DOF30/12/2007-PROMEP, 2007).

El proceso de evolución para todo CA inicia con la figura de *grupo de investigación* o en *formación (GI)*, conformado por profesores de nivel superior que



Figura 1. Integrantes del cuerpo académico de Conservación biológica. De izquierda a derecha: Dra. Sylvia Martínez Hernández, Dr. Pablo Octavio Aguilar, Dra. Dulce María Galván Hernández, Dra. Ana Paola Martínez Falcón, Dr. Aurelio Ramírez-Bautista, Dr. Raúl Ortiz-Pulido y Dr. Arturo Sánchez González

comparten académicamente intereses similares, conocidos como pares académicos, que tienen la necesidad de generar e impulsar una o más líneas de investigación con alta pertinencia social y científica. Con este enfoque, se establecen las bases del trabajo colaborativo que guiarán el desarrollo y crecimiento del grupo. La creación de un GI es natural, ya sea por la afinidad de las investigaciones de cada integrante o por el potencial para generar nuevos proyectos entre los académicos, y así se genera el nuevo conocimiento. En este sentido, el GI establece desde sus inicios las fortalezas para alcanzar sus objetivos (entendidas como el conjunto de conocimientos, redes científicas, habilidades y recursos materiales disponibles), así como las áreas de oportunidad en que debe enfocarse.

Dos aspectos importantes a considerar durante esta primera fase, son: 1) la elección de un líder capaz de propiciar la toma de acuerdos y, 2) el compromiso de los investigadores para sumar su proyección individual al GI y al CA según sea el caso. En nuestra experiencia, tener presentes ambos puntos permitió llegar a consensos y, de acuerdo con nuestras capacidades y recursos, plantear metas congruentes que se concretaron en tiempo y forma.

El siguiente paso para un CA, se conoce como el estatus de *Cuerpo Académico en Consolidación* (CAEC), durante este periodo, el trabajo colaborativo producido por la inercia inicial ha sido sustituido por redes internas totalmente naturales, producto de una mayor madurez del cuerpo, pues se ha aprendido de los proyectos que no han sido viables y se comprende el alcance real de la o las líneas de investigación que se desarrollan.

El último escaño para un grupo es pasar al grado de *Cuerpo Académico Consolidado* (CAC), al que se llega

al cubrir los requisitos académicos solicitados para alcanzar a esta distinción, que es lo deseable.

HISTORIA- FORMACIÓN E INTEGRANTES

Por diversas razones, en el año 2015, tres de los integrantes actuales del CA no formaban parte de un cuerpo académico: Dr. Arturo Sánchez González, Dra. Sylvia Martínez Hernández y Dr. Pablo Octavio Aguilar (Figura 1). Por ello, los tres se dieron a la tarea de conocer los requisitos para formar un grupo de investigación con Registro Interno Universitario (RIU) en la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo (UAEH), que es el primer paso para planear la conformación de un Cuerpo Académico según se desprende de las directivas PRODEP (DOF30/12/2007-PROMEP, 2007). Para ello, los requisitos básicos era tener la definición de una línea de investigación como eje principal de trabajo, la generación de productos académicos y la formación de recursos humanos. Además, se requería otro integrante para cumplir con los requisitos. Afortunadamente, en el año 2016, se integró al Área Académica de Biología (AAB), la Dra. Ana Paola Martínez Falcón, quien fue invitada a participar; iniciando así formalmente el GI, con cuatro integrantes; el grupo de investigación en ese momento, presentó dos ejes de trabajo: Sylvia Martínez y Pablo Octavio en el área de Biotecnología y Ana Paola Martínez y Arturo Sánchez (Figura 1) en temas relacionados con Ecología. Por lo que, el objetivo original fue: Generar conocimiento científico y contribuir a la formación de recursos humanos en el área de Biotecnología aplicada a la resolución de problemas ecológicos y ambientales mediante proyectos colaborativos e integradores con una visión multidisciplinaria que permitiera el uso, manejo y conservación de los recursos naturales (Biodiversidad). Como propuesta fueron dos Líneas de Generación y



Aplicación Innovadora del Conocimiento (LGAC): (1): Caracterización de especies y ecosistemas con potencial biotecnológico, y (2) Biotecnología para la conservación y manejo de la Biodiversidad. El grupo fue aceptado por la universidad en abril del año 2016 con el número GI.RIU-2016 siendo designado como primer líder de este GI, el Dr. Arturo Sánchez González, quien inmediatamente empezó la gestión para conformar un cuerpo académico.

Posteriormente, en junio de 2016, el Dr. Raúl Ortiz-Pulido (Figura 1) organizó una reunión, misma que se llevó a cabo en un café del centro de Pachuca. A ella asistieron el Dr. Aurelio Ramírez Bautista, Dr. Arturo Sánchez González y el Dr. Pablo Octavio Aguilar. En ese entonces, el Dr. Ortiz-Pulido planteó la posibilidad de crear un nuevo grupo académico, pero se sugirió que mejor el Dr. Ortiz-Pulido y el Dr. Ramírez Bautista se integrarían al ya existente. Se argumentó entonces que el grupo ya creado no contaba con producción científica en conjunto entre todos los investigadores que deseaban unirse, las líneas que se trabajaban eran discordantes y que por ello era difícil de integrarlas entre sí, en al menos varios años, además de que en este momento no se contaba con proyectos en común entre todos los miembros del GI incipiente; por todo ello se dijo que la viabilidad de ese GI aún estaba en duda. El Dr. Ramírez Bautista y el Dr. Ortiz-Pulido indicaron que ellos dos ya tenían algunos productos en conjunto y que eso podría ayudar en la propuesta. El Dr. Ortiz-Pulido añadió entonces que tanto ellos dos, como el Dr. Sánchez González, tenían una alta productividad, pues en ese momento todos ellos pertenecían al Sistema Nacional de Investigadoras e Investigadores (SNII) con el nivel II; y añadió que, de encontrar una alternativa viable, la participación del Dr. Pablo Octavio sería vital en ella, pues podría fungir como punto de cohesión ya por su especialidad en genética, y existía el potencial para generar varios proyectos de formación y publicaciones con su enfoque; además en este momento se contaba con proyectos en común, lo que garantizaba generar producción científica entre todos los miembros del CA incipiente en el corto y mediano plazo. A esta propuesta, se integraron los campos que desarrollaban las Dras. Sylvia Martínez y Ana Paola Martínez, quienes ya estaban consideradas en la LGAC original, además de la Dra. Dulce María Galván Hernández que en ese momento era colaboradora, y quien participaba como profesora por asignatura e iniciaba una estancia posdoctoral en la UAEH.

Como acuerdo, se llegó a la propuesta de que el grupo que ya contaba con su registro institucional, podría modificarse para tener un nuevo nombre y enfoque, y que debería cambiarse la LGAC para condensarla en una sola. Con ello se esperaba poder integrar a todos los interesados en participar en la formación de un

nuevo cuerpo académico.

Considerando estos antecedentes, el GI de Conservación Biológica se conformó por los Profesores-investigadores de Tiempo Completo (PTC), Dr. Arturo Sánchez González, Dr. Pablo Octavio Aguilar, Dra. Ana Paola Falcón, Dra. Sylvia Hernández, Dr. Raúl Ortiz Pulido, y Dr. Aurelio Ramírez Bautista; además de la Dra. Dulce María Galván Hernández y el Dr. Francisco Núñez de Cáceres como colaboradores. Posteriormente, en el 2018 la Dra. Dulce María, después de concluir su estancia posdoctoral, se integró formalmente como miembro del CA y la Dra. Jessica Bravo Cadena y el Dr. Christian S. Berriozábal Islas, se integraron como colaboradores.

La formación de este GI se inició ante la necesidad académica de crear un grupo que se enfocara de manera práctica en la biología de la conservación. Como se sabe, la biología de la conservación es la ciencia que busca comprender y proteger la biodiversidad, evitando la extinción de especies y el deterioro de ecosistemas, mediante el estudio, manejo y restauración de la naturaleza y sus procesos vitales (Primack 2020), todo ello visto parcialmente desde un enfoque utilitario, esto es, la continuidad del género humano (R. Ortiz-Pulido, com. pers.). Así es que, considerando eso y las LGAC individuales de los integrantes, se creó dentro del GI una sola línea general. Con este enfoque, el grupo pasó de Grupo de Investigación, a Cuerpo Académico en Consolidación y, finalmente a Cuerpo Académico Consolidado en un tiempo relativamente corto. La transición entre estas tres etapas se concretó en un periodo relativamente corto, de 2016 a 2022.

La colaboración entre los profesores integrantes de este CA se ha realizado de forma constante y disciplinada, buscando fortalecer la línea general de investigación e ir cumpliendo con el objetivo planteado. Por ello, como grupo de investigación (2016-2018; Figura 2) se inició con una fuerte dinámica de producción científica con artículos en el Journal Citation Reports o JCR, que es una base de datos multidisciplinar, realizada por el Institute for Scientific Information [ISI]). En ese periodo produjo en conjunto 6 resultados: 1 artículo de divulgación, 2 artículos arbitrados, 1 capítulo de libro, y 2 libros (Anexo I). En el siguiente nivel, como CA en Consolidación (2019-2021), produjo 15 artículos JCR, 1 artículo de divulgación, 1 artículo arbitrado y 3 capítulos de libro. Finalmente, en el periodo 2022 a 2025 se lograron 9 artículos indexados, 1 de divulgación y 1 capítulo de libro. En la evaluación, para lograr la consolidación, se consideró la producción global de los PTC's durante el periodo 2016 al 2021, que contabilizó un total de 30 artículos JCR, 4 artículos de divulgación, 4 artículos arbitrados sin factor de impacto (como los indexados en Latindex), y 8 capítulos de libro (Figura 2). Ahora, en los años que

siguen, el gran reto es mantener una productividad sostenida para conservar el nombramiento del CA como Consolidado.

EL CA CONSERVACIÓN BIOLÓGICA EN LA DOCENCIA Y FORMACIÓN DE RECURSOS HUMANOS

Además de la productividad académica indicada, los integrantes de este CA han participado activamente en la formación de recursos humanos en los programas educativos: Licenciatura en Biología, y Maestría y Doctorado en Ciencias en Biodiversidad y Conservación (Figura 1, Anexo II). Para ello, atendiendo a sus LGAC individuales, se ha integrado a los profesores del CA en los comités tutorales de los respectivos programas educativos para evaluar y dar seguimiento a los proyectos de investigación de los diversos estudiantes, participando activamente en el seguimiento, hasta que cada estudiante concluye con la defensa de la tesis, y la obtención del grado correspondiente en cada nivel educativo. El tiempo que involucra la formación de recursos humanos varía por nivel educativo, por ejemplo, en la Licenciatura en Biología es

más corto (1.5 años) que en el posgrado (de 2 a 3.5 años); además, esta formación varía también en su dinámica, porque en la maestría y el doctorado hay un seguimiento semestral de los proyectos de investigación, mientras que en la licenciatura solo se realiza en grupo al final. Esto se refleja en las tres etapas por las que ha pasado grupo (i.e., GI, GAEC y CA), pues la actividad de seguimiento (comités) ha aumentado de forma significativa (Figura 2).

En este sentido, la formación de recursos humanos de alta calidad es una actividad crucial del CA, misma que incide en los objetivos locales y nacionales de PRODEP. Como ejemplo del impacto, hoy sabemos que entre 75-80% de nuestros estudiantes egresados de la Licenciatura de Biología, se encuentran ejerciendo su actividad como docentes en secundarias, preparatorias o universidades, o bien laborando en instituciones de Gobierno o realizando estudios de posgrado (UAEH 2024). Por su parte, varios de los egresados con el título de doctor, ya se encuentran laborando en instituciones de gobierno, empresas y dentro del Sistema Nacional de Investigadores e Investigadoras (SNI). Considerando del 2016 a la fecha, más de 15 egresados de la licenciatura

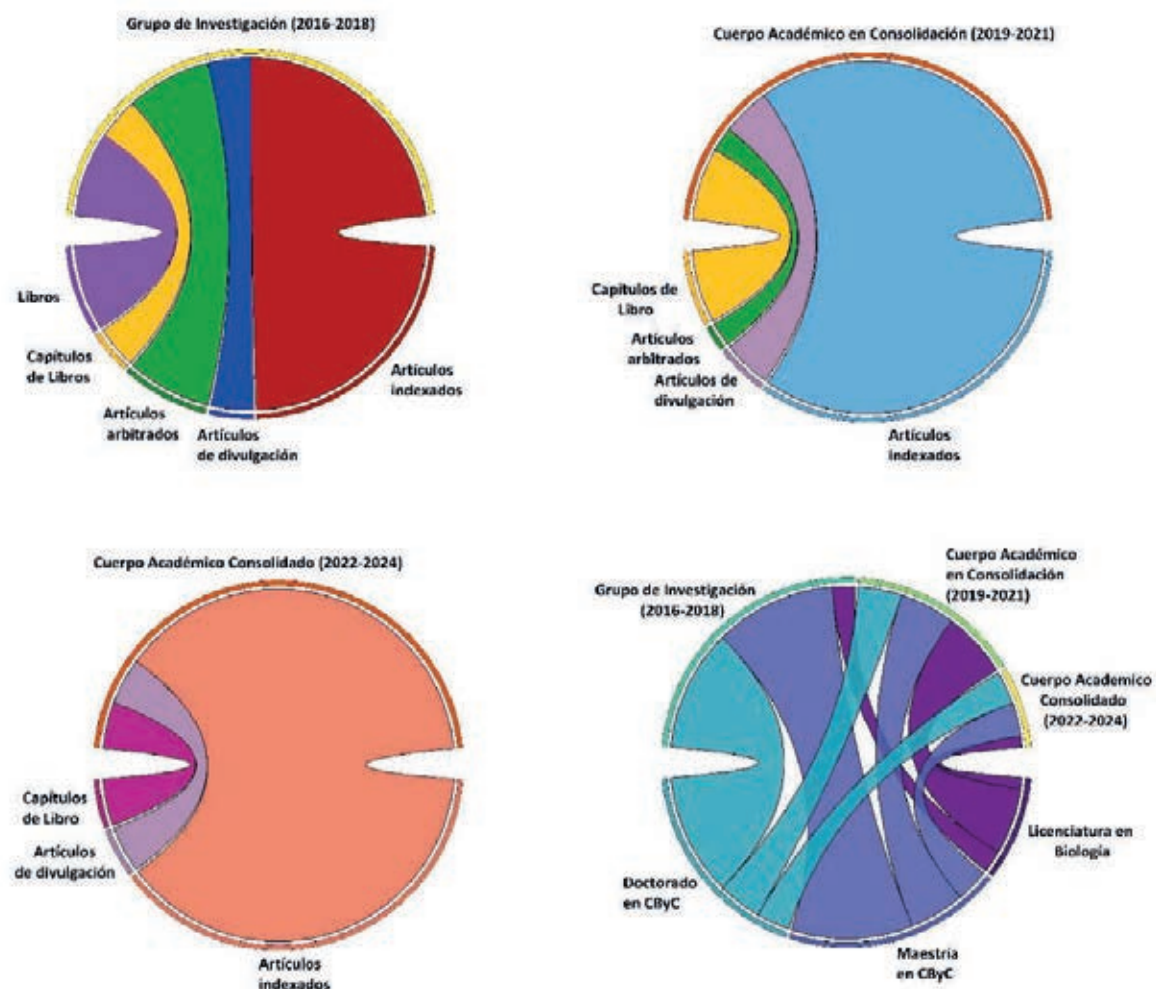


Figura 2. Producción colegiada entre los integrantes del CA de conservación biológica y formación de recursos humanos en distintos momentos de evolución del grupo: como Grupo de investigación (2016-2018), como Cuerpo Académico en Formación (2019-2021) y como Cuerpo Académico Consolidado (2022 a la fecha). Cada sección en que se divide un círculo en su parte externa representa a un integrante del CA. Las líneas uniendo secciones indican los productos compartidos entre integrantes; entre más gruesa una línea, más productos elaborados en forma conjunta entre miembros unidos. Si una sección tiene varios colores, indica colaboración de un profesor con varios profesores.

se encuentran realizando estudios de posgrado actualmente; además, ocho doctores graduados en Biodiversidad y Conservación se encuentran adscritos en universidades nacionales, y siete de ellos pertenecen al SNII con los niveles I o II. Además, cuatro egresados de los diferentes programas educativos son profesores de escuelas preparatorias; todos ellos formados por integrantes del CA entre 2016 y 2025. Con este impacto se busca que el CA de Conservación Biológica cumpla con el objetivo que el PRODEP plateó para los CA, que es elevar la calidad de la educación superior, vocacional y disciplinar en México (DOF30/12/2007-PROMEP, 2007).

DISTINCIONES

Es destacable que, debido a la dinámica constante del trabajo individual y de grupo, el 100% de los integrantes del CA son reconocidos por PROMEP y SNII. En el último caso con distinciones que van desde nivel I a nivel III emérito. Actualmente colaboran activamente con este CA tres investigadores externos: el Dr. Christian S. Berriozábal Islas, la Dra. Jessica Bravo y el Dr. César Díaz, todos ellos con el nivel 1 del SNII. Por otra parte, el Dr. Ramírez-Bautista y el Dr. Ortiz-Pulido han recibido reconocimientos internacionales, por la Southwestern Association of Naturalists y la American Ornithological Society, respectivamente, por sus contribuciones de vida a temas específicos de biología.

DINÁMICA DEL CA PARA ALCANZAR LOS OBJETIVOS

Creemos que los éxitos de este CA se deben a cuatro aspectos:

- Trabajo consensuado y dirigido: la gestión y discusión colegiada para la formación de este CA ha contribuido a enfocar desde un principio las acciones. En ese sentido, el primer líder, el Dr. Arturo Sánchez González, realizó el trabajo que permitió tener los trámites administrativos listos y los primeros productos conjuntos. La siguiente líder, la Dra. Ana Paola Martínez Falcón, se enfocó en promocionar el trabajo conjunto y mantener los estándares académicos altos. Finalmente, recién ha tomado el liderazgo el Dr. Pablo Octavio Aguilar, quien planea trabajar sobre el mismo enfoque, manteniendo la consolidación. Estos líderes trabajaron o trabajan con una dinámica constante que busca la integración del grupo para cumplir con los objetivos planteados en el CA, que finalmente se refleja en los resultados que aquí se muestran.
- Integración en una sola línea de investigación: desde la planeación del grupo pensamos que solo

debíamos tener una sola línea de investigación, por ello, para considerar los diferentes enfoques de los integrantes, la definimos como “conservación de especies y ecosistemas”. Eso ha permitido generar varios proyectos, enfocados principalmente a genética de poblaciones, microbiología, ecología animal, vegetal y de comunidades (como redes tróficas), todas en el contexto de la conservación de especies y sus hábitats. Un ejemplo de cómo se relaciona esta línea de investigación con los integrantes, es el caso de varios de los profesores del CA cuyas líneas de investigación son inter y multidisciplinarias. En estas líneas se han vinculado los integrantes de este CA en varias formas, como en el seguimiento de los proyectos de investigación de los estudiantes. Esto es así porque hay doctores y doctoras que tienen amplio conocimiento sobre los conceptos teóricos de ecología, evolución, e historia natural de los grupos biológicos que trabajan. Ellos y ellas aportan sus conocimientos de diferentes formas, por ejemplo, en el diseño metodológico de los proyectos, ya sea con la parte teórica o de campo. Gracias a la aportación de cada miembro del CA, muchos de los proyectos de los alumnos han avanzado y han sido finalizados. Estos proyectos se han materializado en diversos productos como tesis (de los tres niveles académicos), comunicaciones en congresos nacionales e internacionales, talleres, capítulos de libros, y artículos científicos. Además, gracias a la participación de los integrantes del CA en los proyectos de los estudiantes de la Maestría en Gestión Ambiental, los miembros del cuerpo unen sus conocimientos en la resolución de problemáticas locales y regionales aplicadas, incluyendo cursos de capacitación sobre compostaje, talleres comunitarios para recuperación de suelos después de incendios forestales, propuestas para reforestación municipal con participación ciudadana y de estudiantes de nivel medio superior, así como la promoción del cuidado ambiental en escuelas primarias de diversos municipios. Estos son solo algunos ejemplos de acciones del CA para el acceso universal al conocimiento.

- Fomento de relación académica entre los miembros del CA: esto ha permitido asociar temas aparentemente disímiles, como microbiología y conservación de especies, o la divulgación de la ciencia y la floricultura, fomentando así proyectos colectivos que aportan nuevos enfoques, como el papel que tienen las bacterias en la conservación de la diversidad biológica o el de la divulgación en la conservación de especies polinizadoras; asimismo, se han generado proyectos que tienen fines de aplicación, como la biorremediación de suelos y biolixiviación de minerales usando bacterias o el

de captura de agua y su uso en jardines urbanos con plantas nativas, que fueron financiados con recursos propios; además, gracias a estos proyectos se obtienen recursos en especie que provienen de diferentes niveles, como gubernamental o empresarial, para apoyar a los proyectos de investigación de los estudiantes del CA.

- Alta preparación de los estudiantes del CA: esto es porque es prioridad del CA formar estudiantes que puedan aplicar sus conocimientos prácticamente.
- Buscar tener un impacto local e internacional: el impacto local se evidencia en parte en lo ya dicho, es decir, la formación de recursos humanos. Por ejemplo, durante el periodo en el que el CA tuvo la distinción de GI se participó en 9 comités tutoriales, mientras que en la etapa En Consolidación fueron 19, y como CA Consolidado se ha participado en 18, mayoritariamente a nivel licenciatura. Por su parte, entre los productos que avalan el impacto internacional destacan los artículos publicados en inglés en revistas indizadas JCR, y su número de citas, así como por el número de lectores. Este último parámetro es monitoreado desde la plataforma web de ResearchGate (<https://www.researchgate.net/>). Por ejemplo, algunos artículos publicados en colaboración entre los miembros del CA, tienen cientos de descargas anuales, como el de "Vida silvestre en la Ciudad" (Ortiz-Pulido et al. 2024), o el denominado "Bacterias y plantas ¿Son útiles en la remediación de suelos contaminados con hidrocarburos?", publicado en julio del 2016 (Martínez-Hernández et al., 2016), con 4,545 lecturas al 11 de noviembre del 2025. Otro ejemplo de impacto nacional lo constituye el hecho de que el CA ha influido en la evaluación de Cuerpos Académicos que PROMEP realiza a nivel

nacional. Por ejemplo, gracias a la sugerencia y orientación del Dr. Ortiz-Pulido, PROMEP integró una interfaz visual en su sistema de evaluación. Esta innovación permite una fácil revisión y verificación de la interacción entre los miembros de cada CA, incluyendo publicaciones, formación de recursos humanos y asistencia a congresos, entre otros (un ejemplo de dicha interfaz virtual es semejante a lo que se observa en la Figura 2). Durante más de una década, cientos de evaluadores de PROMEP han empleado esta interfaz para la valoración cualitativa de los CA participantes en el programa, facilitando y enfocando su trabajo.

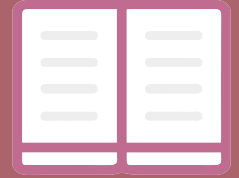
CONCLUSIÓN

El camino desde la formación de un grupo académico, primero como grupo de investigación y finalizando hasta su consolidación, es complejo. Para lograrlo se necesita compromiso por parte de los integrantes y sobre todo, tener objetivos comunes en las líneas de investigación. Los cuerpos académicos surgieron como un requisito de PROMEP para los profesores investigadores de universidades públicas, y con el tiempo, han demostrado ser una estrategia que impulsa a establecer redes colegiadas de colaboración para obtener productos académicos valiosos, desde la formación de recursos humanos hasta la publicación de artículos científicos. El puente entre la formación de un grupo hasta su consolidación puede construirse si se diversifican los productos de los integrantes y se favorecen las metas comunes, lo que conlleva no solo a escalar a la consolidación, sino a formar recursos humanos comprometidos con la sociedad y a aumentar el conocimiento científico en México, como lo ha hecho nuestro CA.

AGRADECIMIENTOS

A la UAEH por cobijarnos cerca de una década y apoyar administrativamente la formación de nuestro CA. A PROMEP por los diversos apoyos que ha otorgado a cada miembro del CA, sobre todo en insumos personales, como computadoras y proyectos individuales. Agradecemos también a todos los estudiantes de los diversos niveles educativos que han confiado en la dirección de sus proyectos por parte de los integrantes del CA de Conservación Biológica, pues nos queda claro que sin su arduo esfuerzo nuestro grupo no hubiera alcanzado los logros aquí resumidos. Finalmente, a Lizzeth Abigail Torres Hernández por su ayuda en la recopilación de datos.

Literatura citada



- DOF30/12/2007-PROMEP. 2007. Diario Oficial de la Federación, DOF: 30/12/2007. Acuerdo número 417 por el que emiten las Reglas de Operación del Programa de Mejoramiento del Profesorado (PROMEP). En: https://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5011999&fecha=30/12/2007#gsc.tab=0 (consultado el 01/05/2025).
- Martínez-Hernández, S., Sánchez-González, A., Martínez-Falcón, A. P., Núñez de Cáceres-González, F. F., & Octavio-Aguilar, P. 2016. Bacterias y plantas ¿son útiles en la remediación de suelos contaminados con hidrocarburos? *TecnolNTELECTO*, Organo de Divulgación Científica. 13(1), 1-10. En: https://www.researchgate.net/publication/310803347_Bacterias_y_plantas_Son_utiles_en_la_remediacion_de_suelos_contaminados_con_hidrocarburos (consultado el 12/10/2025).
- Ortiz-Pulido, R., Octavio-Aguilar, P., Sánchez-González, A., Martínez-Falcón, A.P., Martínez-Hernández, S., Galván-Hernández, D.M., Bravo-Cadena, J. y Ramírez-Bautista, A. 2024. Vida silvestre en la ciudad (especies que habitan en ciudades del centro este de México). *Herreriana* 6 (1):43-50. En: <https://repository.uaeh.edu.mx/revistas/index.php/herreriana/article/view/11789> (consultado 21/10/2025).



CUANDO EL ENTORNO DEJA HUELLA:

TERATOGENÉESIS Y LOS RIESGOS
DEL AMBIENTE EN EL DESARROLLO
EMBRIONARIO



/// JAVIER ASCENCIO-GUERRERO¹, MIRIAM DELGADO-AGUILAR¹, MARIO
MURGUÍA PEREZ^{2,3}, MARTHA ALICIA HERNÁNDEZ-GONZÁLEZ¹, EDUARDO
AGUSTÍN-GODÍNEZ^{3*}

1 Departamento de Medicina y Nutrición, Universidad de Guanajuato Campus León, México

2 Unidad Médica de Alta Especialidad N°-1, CMN del Bajío, IMSS, León Guanajuato México.

3 Laboratorio de Diagnostico Medico en Anatomía Patológica e Inmunohistoquímica (DIME), Especialidades Medica
Campestre, León Guanajuato, México,

*Autor de correspondencia: dr.agustin.patologia@gmail.com

RESUMEN

Durante el desarrollo del ser humano, el embrión atraviesa etapas críticas en las que cualquier alteración, por más pequeña que parezca, puede dejar una huella permanente. La teratogénesis es el proceso mediante el cual agentes externos interfieren en el desarrollo embrionario, provocando anomalías estructurales o funcionales en el feto. El constante aumento de población, la industrialización y urbanización, así como la falta de normas estrictas han permitido que la contaminación atmosférica contribuya de manera significativa donde la contaminación del aire, suelo y agua, así como la exposición ocupacional a sustancias peligrosas, han demostrado tener un impacto significativo en el desarrollo de malformaciones congénitas. El conocer cómo nuestro entorno puede afectar durante el proceso embrionario es de suma importancia, logrando así identificar los posibles factores de riesgo a los que estamos expuestos reduciendo el potencial desarrollo de anomalías.



Palabras clave:

desarrollo embrionario, teratogénesis, contaminación ambiental, malformaciones congénitas, exposición ocupacional.

Keywords: embryonic development, teratogenesis, environmental pollution, birth defects, occupational exposure.

ABSTRACT

During human development, the embryo goes through critical stages in which any alteration, no matter how small, can leave a permanent mark. Teratogenesis is the process by which external agents interfere with embryonic development, causing structural or functional abnormalities in the fetus. The constant increase in population, industrialization and urbanization, and the lack of strict regulations have allowed air pollution to contribute significantly. Air, soil, and water pollution, as well as occupational exposure to hazardous substances, have been shown to have a significant impact on the development of birth defects. Understanding how our environment can affect the embryonic process is crucial, allowing us to identify potential risk factors to which we are exposed and reduce the potential development of birth defects.

INTRODUCCIÓN

El comienzo de la vida es un proceso fascinante y complejo, en el que, a partir de una sola célula, se genera un ser humano completo. Durante este viaje extraordinario, el embrión atraviesa etapas críticas en las que cualquier alteración, por más pequeña que parezca, puede dejar una huella permanente en su desarrollo.

Cada etapa del embarazo presenta distintos niveles de riesgo, durante el primer trimestre, ocurre la mayor parte del desarrollo estructural, de forma particular, entre la semana 3 y la semana 8 se desarrolla la organogénesis, la cual es el proceso en donde los órganos se encuentran en formación (Figura 1) este período es de gran vulnerabilidad a agentes teratogénicos en donde se pueden generar malformaciones mayores. En el segundo trimestre, aunque la formación de órganos ya está avanzada, el crecimiento y la maduración funcional continúan, por lo que ciertos agentes pueden afectar el desarrollo neurológico o el crecimiento fetal. Finalmente, en el

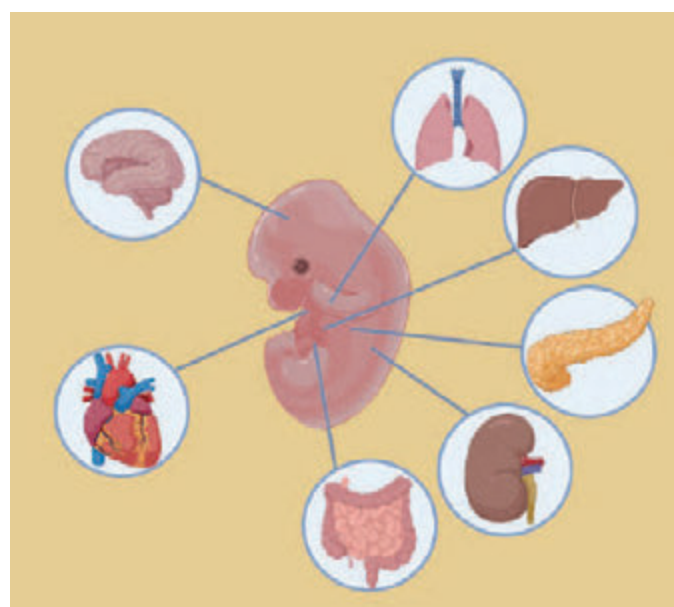


Figura 1. Representación visual de la organogénesis, ilustrando como durante el primer trimestre a lo largo de un período de semanas críticas se desarrolla la formación de cada órgano, esto para su posterior maduración y adquisición de funcionalidad. Created in <https://BioRender.com>

tercer trimestre, el riesgo principal se relaciona con alteraciones en la maduración final de órganos y sistemas, así como con efectos tóxicos o funcionales que podrían manifestarse al nacimiento.

Ahora bien, la teratogénesis es el proceso por el cual agentes externos interfieren en el desarrollo normal embrionario, ocasionando anomalías estructurales o funcionales en el feto (Figura 2). Entre los órganos vulnerables, el corazón destaca por su complejidad y el preciso sincronismo requerido para su formación, cuyo desarrollo temprano puede verse afectado por diversos factores ambientales, dando lugar a malformaciones (Figura 3), conocidas como cardiopatías congénitas (Conley et al., 2013; Sun et al., 2023; Yuan et al., 2023). Dentro de estos factores se encuentran los agentes teratógenos, que pueden ser físicos, químicos y/o biológicos capaces de interferir en el desarrollo normal, provocando malformaciones.

A lo largo de la historia, se han identificado factores clave en el desarrollo de malformaciones congénitas, ejemplos clásicos incluyen el alcohol, cuya exposición en el útero tiene una acción teratogénica en el desarrollo del cerebro fetal pudiendo provocar una amplia gama de consecuencias neuroconductuales conocidas como trastornos del espectro alcohólico fetal que incluyen alteraciones del habla, memoria, aprendizaje, entre otras, además de tener un impacto negativo en el crecimiento fetal (Mattson et al, 2019; Pielage et al, 2023); además de fármacos como la talidomida que en sus inicios se utilizaba para tratar las náuseas matutinas en mujeres embarazadas, y posteriormente se confirmó su potencial teratogénico al afectar a nivel molecular la angiogénesis la cual es el proceso de formación de nuevos vasos sanguíneos tras intercalarse o insertarse en regiones del ADN ricas en guanina-citosina (G-C) reprimiendo factores que estimulan la angiogénesis, a su vez se ha relacionado con alteraciones en la formación de extremidades debido al estrés oxidativo que activa de manera anormal la vía BMP que induce apoptosis (muerte celular programada) mediante la activación del gen Dkk1 (proapoptótico) y como resultado, produce muerte celular excesiva que conduce a la truncación o ausencia parcial de las extremidades (Cooper-Roth 2010; Vargesson 2015); así como el ácido retinoico o derivados de la vitamina A como lo es la isotretinoína, que alteran la regulación de genes involucrados en la formación de órganos como lo son el cerebro, la cara, el paladar, el corazón, entre otros (Choi et al, 2021). Compartiendo un mecanismo teratogénico común ejerciendo un efecto inhibitor sobre la actividad normal y la influencia interactiva de las células de la cresta neural. Sin embargo, en las últimas décadas, el constante aumento de población, la industrialización y la urbanización, así como la falta de regulaciones



Figura 2. Representación clínica y esquemática de una malformación fetal severa. La teratogénesis (del griego teras, τερας; “monstruo” y génesis, γένεσις; “origen” o “formación”). El término surge en la antigüedad para describir la formación de seres con apariencia anómala o monstruosa, muchas veces considerados portadores de mensajes divinos o señales naturales.

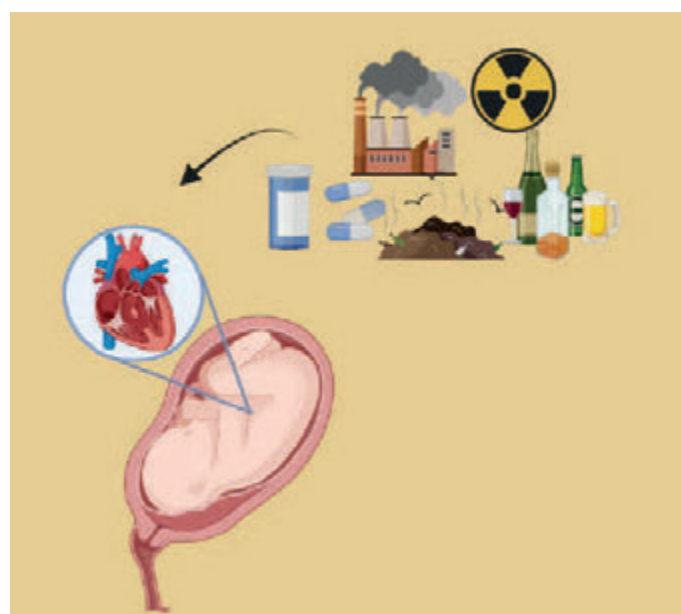


Figura 3. Representación visual de la presencia de agentes teratogénicos en el ambiente, y cómo su exposición durante el desarrollo fetal juega un papel clave en el posible desarrollo de cardiopatías congénitas. Created in <https://BioRender.com>

estrictas, han permitido que la contaminación ambiental juegue un papel significativo en el desarrollo de estas alteraciones (Maisonet et al., 2004; Šrám et al., 2005). En el presente artículo, exploraremos cómo el entorno se puede convertir en un factor de riesgo determinante para el desarrollo fetal, analizando los contaminantes presentes en el aire, suelo y agua, así como los riesgos ocupacionales.

La contaminación de nuestro entorno es uno de los problemas más graves que enfrenta el mundo actual. Entre las consecuencias menos conocidas, pero más preocupantes, se encuentra la posible relación entre la exposición a contaminantes ambientales durante el embarazo y el riesgo de anomalías congénitas en



Figura 4. Representación visual de cómo la constante inhalación de aire contaminado permite que partículas ultrafinas puedan atravesar la barrera placentaria, llegando al torrente sanguíneo del feto y alterando la expresión genética o el desarrollo de células aumentando la probabilidad de alteraciones

los recién nacidos. Estos riesgos surgen de una gran variedad de fuentes, como la contaminación del aire, agua, y suelo, la exposición ocupacional y la presencia de metales pesados en los alimentos (Helen et al., 2003; Vrijheid et al., 2011; Ravindra et al., 2021). A continuación, hablaremos de cada una de estas fuentes.

LO QUE NUESTRO AMBIENTE CUENTA Y NUESTROS OJOS NO VEN

La contaminación del aire es un problema que además de afectar nuestra salud respiratoria, se ha establecido que puede dejar huellas profundas en el desarrollo de los bebés durante el embarazo (Proietti et al., 2013; Wan et al., 2023). Lo anterior debido a que diversos estudios han demostrado que la exposición materna a contaminantes atmosféricos, cuyo tamaño no superan los 2.5 micrometros (μm) es decir 2.5 millonesimas partes de un metro que para poner en perspectiva el diminuto tamaño de estas partículas, recordemos que el cabello tiene aproximadamente un grosor de 50-100 μm , puede incrementar el riesgo de malformaciones congénitas (Vrijheid et al., 2011; Yuan et al., 2023). Durante las primeras semanas de gestación, cuando el corazón del embrión se está formando, la inhalación constante de aire contaminado puede interferir con procesos biológicos clave, provocando anomalías estructurales o funcionales.

Pero, ¿cómo es que estas diminutas partículas pueden ocasionar alteraciones?, pese a su pequeño tamaño estas partículas ultrafinas pueden atravesar la barrera placentaria, llegando al torrente sanguíneo del feto y

alterando la expresión génica o el desarrollo de células aumentando la probabilidad de alteraciones (Figura 4). La zona de residencia de la madre es un factor clave ya que las madres que viven en zonas urbanas o industriales (Basil et al., 2013; Brender et al., 2006), donde la calidad del aire es deficiente, se encuentran en mayor riesgo al estar constantemente expuestas a estos factores. Por otro lado, aquellos expuestos a zonas verdes como parques, árboles u otros tipos de vegetación se encuentran en menor riesgo (Weber et al., 2023).

LO QUE COMEMOS Y BEBEMOS

Aunque a menudo desapercibida, la contaminación del suelo es otro factor que puede afectar el desarrollo embrionario y causar malformaciones congénitas., ya que la presencia de sustancias tóxicas en el suelo, como metales pesados (plomo, cadmio, mercurio), pesticidas y desechos industriales, representa un riesgo significativo para las mujeres embarazadas.

Estos contaminantes pueden ingresar al cuerpo a través del consumo de alimentos cultivados en suelos contaminados o por contacto directo con la tierra. Una vez en el cuerpo de la madre, las sustancias tóxicas pueden lograr pasar al torrente sanguíneo fetal a través de la placenta, interfiriendo en procesos críticos del desarrollo embrionario (Figura 5). Teniendo potencial de ocasionar malformaciones congénitas, en particular defectos cardíacos, del sistema nervioso o del aparato musculoesquelético (Figura 6). Sin embargo, pese a que estudios han encontrado contaminación de metales

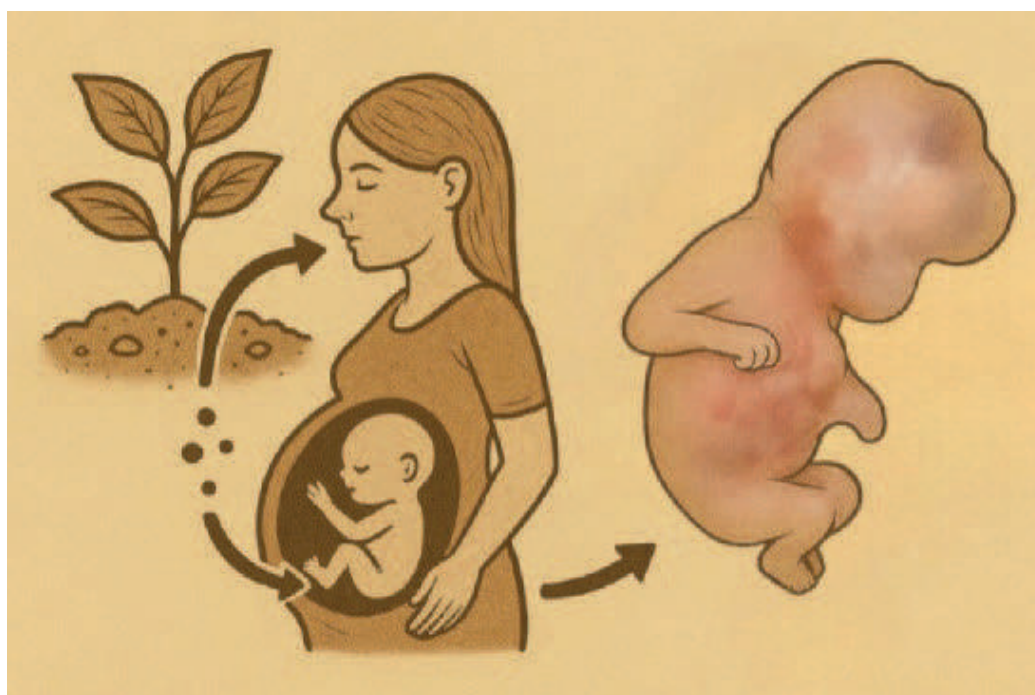


Figura 5. Representación visual de cómo el consumo de alimentos cultivados en suelos contaminados o por contacto directo con la tierra pueden lograr pasar al torrente sanguíneo fetal a través de la placenta, interfiriendo en procesos críticos del desarrollo embrionario.

pesados en diversos productos alimenticios, la asociación entre la exposición y el desarrollo de malformaciones congénitas permanece controversial (Miyashita et al., 2021, Gorini et al., 2023, Wróblewski et al., 2025).

Por otro lado, la contaminación del agua es una amenaza silenciosa que además de afectar directamente la salud humana también afecta el desarrollo embrionario durante el embarazo (Rudnai et al., 2014). Las fuentes de agua contaminadas se han convertido en factores críticos, donde la exposición prolongada a metales pesados, como el mercurio procedente de aguas residuales industriales, supone riesgos considerables (Dasharathy et al., 2022). Así mismo, la fauna, en específico los peces, pueden provocar una exposición crónica de mercurio, poniendo en riesgo a las poblaciones que dependen de estos peces para su sustento.

No obstante, el problema radica en que los metales pesados proceden de diversas fuentes, ejemplo de ello son los fertilizantes y lodos de depuradora, los cuales

también pueden filtrarse a las aguas subterráneas afectando los productos agrícolas sin nosotros saberlo, lo que aumenta el riesgo de exposición tóxica. Metales como el plomo, el mercurio, el cadmio y el arsénico pueden encontrarse en pescados, mariscos, verduras, frutas y granos contaminados debido a prácticas agrícolas inapropiadas, contaminación industrial o acumulación en el medio ambiente.

¿EL TRABAJO SUPONE UN RIESGO?

El trabajo si supone un riesgo, ya que ciertos sectores laborales son especialmente vulnerables a exposiciones peligrosas durante el embarazo (Lin et al., 2013; Spinder 2020). Industrias como la agricultura (debido a la exposición a pesticidas), la manufactura (que implica disolventes orgánicos y metales pesados) y la atención sanitaria (que implica radiación y productos biológicos) presentan riesgos significativos para las madres trabajadoras (Spinder et al., 2019). Estos contaminantes pueden ingresar al organismo por inhalación, contacto en la piel o ingestión accidental, afectando tanto la salud materna como el desarrollo fetal. Colocando a las mujeres embarazadas que trabajan en estas áreas en niveles de exposición más altos que la población

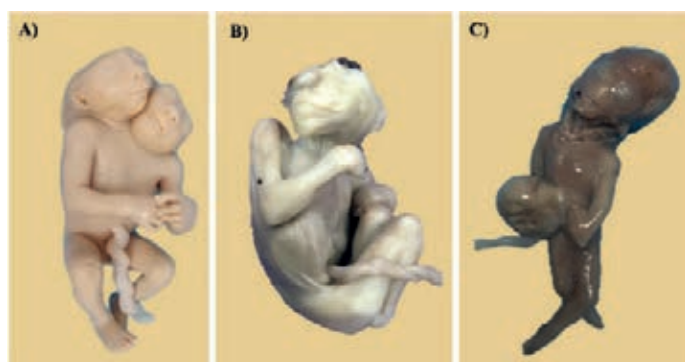


Figura 6. Ejemplos de malformaciones fetales mayores asociadas a teratogénesis. A) Feto con duplicación craneofacial (dicefalia parcial), correspondiente a una forma de gemelos siameses. B) Feto con holoprosencefalia alobar y ciclopía, malformación grave del prosencéfalo. C) Feto con onfalocelo y macrocefalia, alteraciones morfológicas que sugieren interrupción del desarrollo embrionario temprano.

general, lo que podría provocar consecuencias negativas para la salud reproductiva. Es fundamental que las mujeres embarazadas reciban protección adecuada en el entorno laboral, mediante el uso de equipos de protección personal (EPP), ventilación adecuada y prácticas de manejo seguro de sustancias peligrosas.

Sin importar si los contaminantes provienen del aire que respiramos, del agua que bebemos, del suelo donde se cultivan los alimentos o del ambiente laboral, muchos de ellos comparten mecanismos similares que pueden afectar el desarrollo del bebé durante el embarazo. Estos agentes pueden entrar al cuerpo de la madre y llegar hasta la placenta, donde algunos logran atravesarla y alcanzar al embrión. Una vez allí, pueden alterar procesos esenciales como la división celular, la formación de tejidos y la expresión de genes. Además, algunos contaminantes generan estrés oxidativo e interfieren con señales químicas necesarias para que el desarrollo siga su curso normal. Cuando estos mecanismos se ven interrumpidos en etapas críticas, especialmente durante las primeras semanas de gestación, aumenta la probabilidad de que ocurran malformaciones congénitas. Así, aunque las fuentes de exposición sean distintas, el modo en que perjudican al desarrollo fetal suele converger en estos mismos procesos biológicos vulnerables.

CONCLUSIÓN

La influencia de los factores ambientales en el desarrollo embrionario es un tema de creciente preocupación. La evidencia presentada en distintos estudios resalta cómo diversos agentes contaminantes, ya sean físicos, químicos o biológicos, pueden actuar como teratógenos y alterar procesos biológicos críticos durante la gestación, incrementando el riesgo de malformaciones congénitas.

Es fundamental que las políticas públicas adopten un enfoque integral que contemple tanto la reducción de contaminantes ambientales como la implementación de medidas de protección laboral específicas para mujeres embarazadas. Destacando la importancia de sensibilizar sobre los riesgos ambientales y ocupacionales para contribuir a reducir la incidencia de malformaciones congénitas y promover ambientes más seguros para el desarrollo fetal.

Además, las futuras madres deben recibir orientación parte de esta el evitar la ingesta de alimentos y bebidas contaminados con metales pesados; evitar a toda costa el consumo de alcohol y tabaco, y si es posible, evitar la exposición laboral a metales pesados, radiación, entre otros. Así como la necesidad de un seguimiento estricto para proteger la salud del bebé en desarrollo.

A su vez, se requiere un mayor esfuerzo en la investigación de los mecanismos de teratogénesis asociados con la exposición ambiental, lo que permitirá diseñar estrategias de prevención más efectivas y basadas en evidencia científica. Proteger el entorno no solo es fundamental para el planeta, sino también para garantizar un desarrollo saludable desde el inicio de la vida.

Pese a no verlo ni conocerlo en su totalidad, la contaminación ambiental representa un peligro latente que se ha vinculado con efectos negativos en la salud reproductiva. La contaminación del aire, suelo, agua y las condiciones laborales pueden conferir un mayor riesgo en el desarrollo de malformaciones congénitas. De esta manera, el entorno deja una huella imborrable en la vida de los seres humanos desde su gestación.

“DEFORMED, UNFINISHED, SENT BEFORE MY TIME INTO THIS BREATHING WORLD, SCARCE HALF MADE UP, AND THAT SO LAMELY AND UNFASHIONABLE THAT DOGS BARK AT ME AS I HALT BY THEM.”

— WILLIAM SHAKESPEARE, HAMLET

Esta cita resuena como una imagen desgarradora de la monstruosidad no como mito, sino como tragedia biológica. Habla de aquello que llega al mundo incompleto, torcido por causas que lo anteceden, como si la existencia misma fuera interrumpida en su diseño. En el contexto de la teratogénesis, esas palabras adquieren una dimensión más cruda: nos confrontan con los efectos que un entorno hostil puede imprimir sobre un ser humano antes siquiera de nacer. No se trata solo de defectos anatómicos, sino de una alteración profunda del proceso vital, una herida originaria infligida por agentes externos. Así, lo monstruoso ya no es símbolo del castigo divino ni del azar biológico, sino el eco de una negligencia ambiental que se gesta en silencio y se manifiesta en cuerpos marcados para siempre.

Literatura citada



- Bassil, K. L., Collier, S., Mirea, L., Yang, J., Seshia, M. M., Shah, P. S., Lee, S. K., & Canadian Neonatal Network (2013). Association between congenital anomalies and area-level deprivation among infants in neonatal intensive care units. *American journal of perinatology*, 30(3), 225–232. <https://doi.org/10.1055/s-0032-1323584>
- Brender, J. D., Zhan, F. B., Suarez, L., Langlois, P., Gilani, Z., Delima, I., & Moody, K. (2006). Linking environmental hazards and birth defects data. *International journal of occupational and environmental health*, 12(2), 126–133. <https://doi.org/10.1179/oeh.2006.12.2.126>
- Conley, J., Richards, S. (2013). Environmental Teratogenesis. In: Férard, J.F., Blaise, C. (eds) *Encyclopedia of Aquatic Ecotoxicology*. Springer, Dordrecht. https://doi.org/10.1007/978-94-007-5704-2_43
- Cooper-Roth, Tristan, “The Effects of Thalidomide on Embryonic Development”. *Embryo Project Encyclopedia* (2010-09-12). ISSN: 1940-5030 <https://hdl.handle.net/10776/2061>
- Choi, E. J., Kim, N., Kwak, H. S., Han, H. J., Chun, K. C., Kim, Y. A., Koh, J. W., Han, J. Y., Joo, S. H., Lee, J. S., & Koren, G. (2021). The rates of major malformations after gestational exposure to isotretinoin: a systematic review and meta-analysis. *Obstetrics & gynecology science*, 64(4), 364–373. <https://doi.org/10.5468/ogs.20373>
- Dasharathy, S., Arjunan, S., Maliyur Basavaraju, A., Murugasen, V., Ramachandran, S., Keshav, R., & Murugan, R. (2022). Mutagenic, Carcinogenic, and Teratogenic Effect of Heavy Metals. Evidence-based complementary and alternative medicine : eCAM, 2022, 8011953. <https://doi.org/10.1155/2022/8011953>
- Gorini F, Tonacci A. Toxic metals in pregnancy and congenital heart defects. Insights and new perspectives for a technology-driven reduction in food sources. *Explor Cardiol*. 2023;1:114–40. <https://doi.org/10.37349/ec.2023.00012>
- Helen Dolk, Martine Vrijheid, The impact of environmental pollution on congenital anomalies, *British Medical Bulletin*, Volume 68, Issue 1, December 2003, Pages 25–45, <https://doi.org/10.1093/bmb/ldg024>
- Rudnai, T., Sándor, J., Kádár, M., Borsányi, M., Béres, J., Métneki, J., Marácz, G., & Rudnai, P. (2014). Arsenic in drinking water and congenital heart anomalies in Hungary. *International journal of hygiene and environmental health*, 217(8), 813–818. <https://doi.org/10.1016/j.ijheh.2014.05.002>
- Lin, S., Herdt-Losavio, M. L., Chapman, B. R., Munsie, J. P., Olshan, A. F., Druschel, C. M., & National Birth Defects Prevention Study (2013). Maternal occupation and the risk of major birth defects: a follow-up analysis from the National Birth Defects Prevention Study. *International journal of hygiene and environmental health*, 216(3), 317–323. <https://doi.org/10.1016/j.ijheh.2012.05.006>
- Maisonet, M., Correa, A., Misra, D., & Jaakkola, J. J. (2004). A review of the literature on the effects of ambient air pollution on fetal growth. *Environmental research*, 95(1), 106–115. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2004.01.001>
- Mattson, S. N., Bernes, G. A., & Doyle, L. R. (2019). Fetal Alcohol Spectrum Disorders: A Review of the Neurobehavioral Deficits Associated With Prenatal Alcohol Exposure. *Alcoholism, clinical and experimental research*, 43(6), 1046–1062. <https://doi.org/10.1111/acer.14040>
- Miyashita, C., Saijo, Y., Ito, Y., Ikeda-Araki, A., Itoh, S., Yamazaki, K., Kobayashi, S., Ait Bamai, Y., Masuda, H., Tamura, N., Itoh, M., Yamaguchi, T., Yamazaki, S., Kishi, R., & The Japan Environment And Children's Study Group (2021). Association between the Concentrations of Metallic Elements in Maternal Blood during Pregnancy and Prevalence of Abdominal Congenital Malformations: The Japan Environment and Children's Study. *International journal of environmental research and public health*, 18(19), 10103. <https://doi.org/10.3390/ijerph181910103>
- Organización Mundial de la Salud (OMS), 2023. Congenital disorders. En: <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/birth-defects> (consultado el 19/03/2025)
- Pan, Z., Gong, T., & Liang, P. (2024). Heavy Metal Exposure and Cardiovascular Disease. *Circulation research*, 134(9), 1160–1178. <https://doi.org/10.1161/CIRCRESAHA.123.323617>
- Pielage, M., El Marroun, H., Odendaal, H.J. et al. Alcohol exposure before and during pregnancy is associated with reduced fetal growth: the Safe Passage Study. *BMC Med* 21, 318 (2023). <https://doi.org/10.1186/s12916-023-03020-4>
- Proietti, E., Rössli, M., Frey, U., & Latzin, P. (2013). Air pollution during pregnancy and neonatal outcome: a review. *Journal of aerosol medicine and pulmonary drug delivery*, 26(1), 9–23. <https://doi.org/10.1089/jamp.2011.0932>
- Ravindra, K., Chanana, N., & Mor, S. (2021). Exposure to air pollutants and risk of congenital anomalies: A systematic review and metaanalysis. *The Science of the total environment*, 765, 142772. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142772>
- Spinder, N., Prins, J. R., Bergman, J. E. H., Smidt, N., Kromhout, H., Boezen, H. M., & de Walle, H. E. K. (2019). Congenital anomalies in the offspring of occupationally exposed mothers: a systematic review and meta-analysis of studies using expert assessment for occupational exposures. *Human reproduction (Oxford, England)*, 34(5), 903–919. <https://doi.org/10.1093/humrep/dez033>
- Spinder, N. (2020). Maternal occupational exposure and congenital anomalies. [Thesis fully internal (DIV), University of Groningen]. University of Groningen. <https://doi.org/10.33612/diss.136730422>
- Srám, R. J., Binková, B., Dejmek, J., & Bobak, M. (2005). Ambient air pollution and pregnancy outcomes: a review of the literature. *Environmental health perspectives*, 113(4), 375–382. <https://doi.org/10.1289/ehp.6362>
- Sun, L., Wu, Q., Wang, H., Liu, J., Shao, Y., Xu, R., Gong, T., Peng, X., & Zhang, B. (2023). Maternal exposure to ambient air pollution and risk of congenital heart defects in Suzhou, China. *Frontiers in public health*, 10, 1017644. <https://doi.org/10.3389/fpubh.2022.1017644>
- Vargesson N. (2015). Thalidomide-induced teratogenesis: history and mechanisms. *Birth defects research. Part C, Embryo today : reviews*, 105(2), 140–156. <https://doi.org/10.1002/bdrc.21096>
- Vrijheid, M., Martinez, D., Manzanares, S., Dadvand, P., Schembari, A., Rankin, J., & Nieuwenhuijsen, M. (2011). Ambient air pollution and risk of congenital anomalies: a systematic review and meta-analysis. *Environmental health perspectives*, 119(5), 598–606. <https://doi.org/10.1289/ehp.1002946>
- Wan, X., Wei, S., Wang, Y., Jiang, J., Lian, X., Zou, Z., & Li, J. (2023). The association between maternal air pollution exposure

and the incidence of congenital heart diseases in children: A systematic review and meta-analysis. *The Science of the total environment*, 892, 164431. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.164431>

Weber, K. A., Yang, W., Carmichael, S. L., Collins, R. T., 2nd, Luben, T. J., Desrosiers, T. A., Insaf, T. Z., Le, M. T., Evans, S. P., Romitti, P. A., Yazdy, M. M., Nembhard, W. N., Shaw, G. M., & National Birth Defects Prevention Study (2023). Assessing associations between residential proximity to greenspace and birth defects in the National Birth Defects Prevention Study. *Environmental research*, 216(Pt 3), 114760. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.114760>

Wróblewski, M., Miłek, J., Godlewski, A., & Wróblewska, J. (2025). The Impact of Arsenic, Cadmium, Lead, Mercury, and Thallium Exposure on the Cardiovascular System and Oxidative Mechanisms in Children. *Current issues in molecular biology*, 47(7), 483. <https://doi.org/10.3390/cimb47070483>

Yuan, X., Liang, F., Zhu, J., Huang, K., Dai, L., Li, X., Wang, Y., Li, Q., Lu, X., Huang, J., Liao, L., Liu, Y., Gu, D., Liu, H., & Liu, F. (2023). Maternal Exposure to PM_{2.5} and the Risk of Congenital Heart Defects in 1.4 Million Births: A Nationwide Surveillance-Based Study. *Circulation*, 147(7), 565–574. <https://doi.org/10.1161/CIRCULATIONAHA.122.061245>

THE PRESENCE OF THE RESPLENDENT QUETZAL *PHAROMACHRUS MOCINNO* IN OAXACA, MEXICO

ELÍ GARCÍA-PADILLA¹, RAMÓN CASTELLANOS-GIRALDA²,
PATRICIA ESCALANTE-PLIEGO³, ISADORA HEREDIA-LÓPEZ¹, IVÁN
VILLALOBOS-JUÁREZ⁴, LEONEL BAUTISTA-BAUTISTA¹, DONATO
ACUCA-VÁZQUEZ†⁵ AND GRACIELA ALCÁNTARA-SALINAS⁵



¹Biodiversidad Mesoamericana. Oaxaca de Juárez, Oaxaca, México 68016 eligarciapadilla86@gmail.com.

²WildLife Conservation Services México, Luis Peláez #3 Col. Marcelo Rubio, Guerrero Negro, 23940, Mulegé, BCS vidasilvestre@me.com

³Instituto de Biología, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad Universitaria 04510 Coyoacán, Ciudad de México.

⁴Los Hijos del Desierto. José María Morelos 405. El Valle de las Delicias. Rincón de Romos, Aguascalientes 20427 Aguascalientes.
lepidushunter@gmail.com

⁵Colegio de Postgraduados Campus Córdoba, Carretera Federal Córdoba-Veracruz km 348, Manuel León, Amatlán de los Reyes,
Veracruz 94953.



Keywords: Trogonidae, Isthmus of Tehuantepec, cloud forest, distribution

Palabras clave: Trogonidae, Istmo de Tehuantepec, bosque mesófilo de montaña, distribución

ABSTRACT

The Resplendent Quetzal (*Pharomachrus mocinno*) is reported in Oaxaca, Mexico, seven decades after the Scottish-born, naturalized Mexican explorer and naturalist Thomas MacDougall first discovered it between La Gloria and Cerro Azul in the Los Chimalapas region of the Isthmus of Tehuantepec, Oaxaca. With this discovery and the compilation of other records, the Los Chimalapas region represents a site of great importance for further research and for promoting the community conservation system of its biodiversity, which is the highest in the country.

RESUMEN

Se reporta el quetzal mesoamericano (*Pharomachrus mocinno*) en el estado de Oaxaca, México después de siete décadas desde que el explorador y naturalista de origen escocés y naturalizado mexicano Thomas MacDougall lo descubriera por primera vez entre La Gloria y Cerro Azul en la región de Los Chimalapas en el Istmo de Tehuantepec, Oaxaca, México. Con el hallazgo de la presencia de esta ave tan emblemática y la recopilación de otros registros históricos, la región de Los Chimalapas representa un sitio de gran relevancia para realizar más investigaciones; así como para promover la conservación comunitaria de su biodiversidad, que es la más alta a nivel país.

INTRODUCTION

The Resplendent Quetzal (*Pharomachrus mocinno*) is an iconic and emblematic species of the humid mountain forests (Álvarez del Toro & Palacios-Espinoza, 1993; Ávila-Hernández, 1998; Solórzano et al., 2009). It belongs to the Trogonidae family and is listed as “endangered” in the Mexican NOM-059-SEMARNAT (2025) and globally as “Near Threatened” by the IUCN (2025). Its distribution ranges from Mexico to Central America, including Guatemala, Honduras, El Salvador, Nicaragua, Costa Rica, and western Panama (Howell & Webb, 1995). Based on biogeographical, morphological, acoustic, and genetic evidence, the species comprises two subspecies: *P. m. mocinno* and *P. m. costaricensis*, which represent two sufficiently distinct evolutionary lineages (Solórzano et al., 2009; García-Padilla & Escalante-Pliego, 2022) to be considered separate species. However, the AOS check-list Committee, under the Biological Species Concept, has not approved the taxonomic change.

In Mexico, the species has been recorded in the Los Chimalapas region of Oaxaca (Hoffmeister, 1951; Rowley, 1984; Binford, 1989; Peterson et al., 2003); in Chiapas, from the Sierra Madre in the localities of La Sepultura, El Triunfo, and Volcán Tacaná (Ávila-Hernández, 1998; Solórzano et al., 2009), as well as in the mountains of the northern and eastern physiographic regions of Chiapas (Hoffmeister, 1951; García-Padilla & Escalante-Pliego, 2022; Guirao-Cruz et al., 2012; Palacio-Peralta et al., 2009).

This document aims to provide new evidence of the presence of *Pharomachrus mocinno* in the Los Chimalapas region of Oaxaca, also confirming its northernmost distribution on the continent. We seek to highlight and communicate not only the biological importance of the region, but also the community conservation system practiced by the indigenous communities.

THE HISTORICAL PRESENCE OF THE RESPLENDENT QUETZAL IN OAXACA

The Resplendent Quetzal was first recorded in the Mexican state of Oaxaca by the Scottish-born, naturalized Mexican explorer and naturalist Thomas MacDougall, who collected it at Los Chimalapas on the Isthmus of Tehuantepec (Rowley, J. S. 1984) in the “cloud forest near the dividing line on the Atlantic slope of the Sierra Madre, at about 1,525m elevation and approximately 19.3 kilometres east of La Gloria, and towards Cerro Azul (Cerro Prieto), Oaxaca, on 25 March 1949. La Gloria is 29 kilometres north of Niltepec and about 80 kilometres northeast of Tehuantepec. Cerro Azul or Cerro Prieto is the local name for the highest group of peaks in the Sierra Madre. The place where the Quetzal was collected had many epiphytic plants, including several species of cacti and bromeliads, along with tree ferns, various kinds of understory of palms and acorn oaks, and, to a lesser extent, white pines, and red gums. The trees were heavily covered with moss. The specimen obtained was one of a pair, apparently nesting, and the female remained in the area after the male had been collected” (Hoffmeister, 1951).

According to MacDougall (1971), the first record for Oaxaca was obtained on 25 March 1949, and the locality undoubtedly represents the extreme extension of the mountain range. Considering this specimen in their monumental work, Miller et al. (1957) noted it at the extreme eastern part of Oaxaca (12 miles east of La Gloria). According to Olguín-Monroy et al. (2008), La Gloria is a locality in the municipality of Santa María Chimalapa, and they mention two possible points: 1. La Gloria, a settlement 11.3 km south of Santa María Chimalapa, with coffee and corn plantations, high jungle, near 460 meters above sea level (m.a.s.l.); 2. La Gloria, rainforest, 10 km south of Santa María Chimalapa, around 760 m.a.s.l. Rowley (1984) mentioned two localities where occupied nests were found: Cerro Baúl, 40 km northwest of Tapanatepec, at more than 2,200 m.a.s.l.; and Rancho Los Minne, at 2,300 m.a.s.l., where cloud forest was the predominant vegetation.

Peterson et al. (2003) reported seven specimens from the Sierra El Retén collected in 1964 and deposited in the Western Foundation of Vertebrate Zoology, and from their own observations: one in the Sierra Espinazo del Diablo in 1991, and in 1991 and 1997, an abundant population above Benito Juárez (Cerro Salomón and Cerro Guayabitos).

In 1997, Donato Acuca-Vázquez recorded a total of 18 adult sightings (only one female) and two juveniles in May within the cloud forest of San Miguel Chimalapa; 18 individuals may represent the largest population

recorded so far in Oaxaca. Donato also noted that the localities described by MacDougall and Rowley were already very disturbed at the time of his expedition. His field observations were not published and are now included in this document.

RESULTS OF THE FIELD OBSERVATIONS

We report a recent field observation of the Resplendent Quetzal in El Cordón del Retén (Community Conservation Area) in the Los Chimalapas region. This area covers 15,328 hectares. The record of this species was obtained on 5 December 2010 at 12:47, when RCG heard the characteristic vocalization of the species and photographed a male individual (Figure 1), 3 kilometers west of San Antonio in the municipality of San Miguel Chimalapa. The expedition involved two weeks of searching within the cloud forest of San Miguel Chimalapa, characterized by dominant trees of the genus *Ticodendron* and others from the *Lauraceae* family, as well as *Pinus chiapensis*, with an undergrowth of tree ferns, *Chamaedorea* palms, bamboos, and other species. The trees host many bromeliads, orchids, and mosses. According to Schibli (personal communication), "*this forest had an area of 63,000 hectares, which makes possible a larger population for the species in Oaxaca compared to El Triunfo, Chiapas, but this possibility had to be confirmed.*" He also noted that the localities cited by MacDougall and Rowley were already very disturbed by that date. All additional localities available in the



Figure 1: Male Resplendent Quetzal in the Cordón del Retén Community Conservation Area in the municipality of San Miguel Chimalapa, Oaxaca, Mexico (Photo by Ramón Castellanos Giralda).

literature and those obtained during an expedition led by the late Donato Acuca-Vázquez in 1998 are mentioned in Figure 2.

The Los Chimalapas region is one of the few areas in Mexico that remains a large, well-preserved mosaic of tropical rainforests. There is also an important remnant of cloud forest, separated from other cloud forests in Oaxaca by the Isthmus of Tehuantepec, with a rich composition of plant and animal species (Stotz et al., 1996). Researchers such as Miguel Ángel García Aguirre (pers. comm.) recognize the eastern zone of the Sierra del Espinazo del Diablo as having the highest levels of biodiversity in the region. During a recent visit by EGP to the village of San Francisco La Paz in the municipality of Santa María Chimalapa, community members reported recent sightings of the Resplendent Quetzal in the

cloud forest areas of this mountain range, known as El Espinazo del Diablo.

Localities where the species had previously been observed, as mentioned by MacDougall in Los Chimalapas, include "La Gloria." The senior author of this note visited La Gloria in November 2017 and May 2018, but did not record a single individual or vocalization of the species. Although the tropical evergreen forest is in excellent condition and elements typical of cloud forest, such as tree ferns, were observed in nearby areas, the species was not detected at this site. Additionally, the author interviewed community guides and hunters of Zoque Chimalapa origin from Santa María Chimalapa, who stated they did not know of such a bird in the area or region.

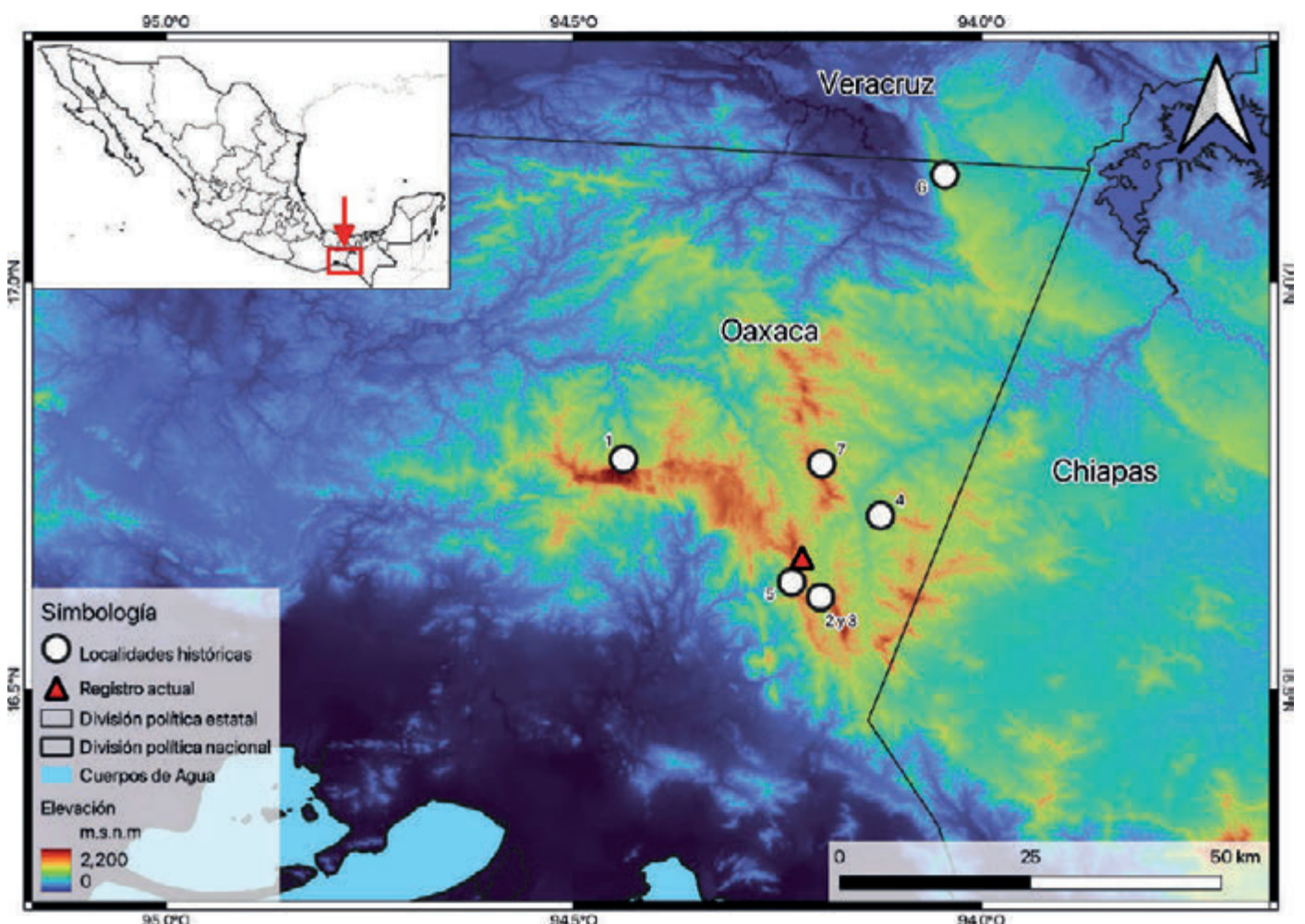


Figure 2. Recent and previous records of the Mesoamerican Quetzal in the Los Chimalapas region, Oaxaca, Mexico. Locality #1: Cloud forest near the dividing line on the Atlantic slope of the Sierra Madre, at about 1,525 m elevation and approximately 19.3 kilometers east of La Gloria, toward Cerro Azul (Cerro Prieto). Locality #2: Cerro Baúl, 40 km northwest of Tapanatepec, at more than 2,200 meters above sea level. Locality #3: Rancho Los Minne, above 2,300 meters above sea level (Ranchería de Cerro Baúl). Locality #4: Mesophilic forests in the eastern part of the Chimalapas region, in the municipality of Santa María Chimalapa, approximately 10 km in a straight-line northwest of the community of Benito Juárez (San Miguel Chimalapa). Locality #5: Sierra Retén. Locality #6: Sierra Espinazo del Diablo. Locality #7: Above Benito Juárez (Cerro Salomón and Cerro Guayabitos). Locality of this study: Cordón del Retén, 3 kilometers west of the town of San Antonio in the municipality of San Miguel Chimalapa (16°39' N, 94°13' W; 1,523 m.a.s.l.).

CONCLUSIONS AND RECOMMENDATIONS

Although the Resplendent Quetzal (*Pharomachrus mocinno*) is considered an emblem of the Mesoamerican cloud forests – one of the most threatened ecosystems globally (Álvarez del Toro and Palacios-Espinoza 1993, Ávila-Hernández 1998, Solórzano et al. 2009)—little is known about its precise distribution and natural history in the northernmost part of its range. Thanks to recent fieldwork in regions previously considered inaccessible or unsafe, such as the mythical Los Chimalapas region, our team has obtained valuable records of some species previously considered “lost,” “extinct,” or simply overlooked by the scientific community. This is the case for the Resplendent Quetzal, a species long considered absent or probably extinct from the Oaxacan avifauna by many ornithologists who evidently overlooked historical records and the very few more recent sightings and formal or informal reports, including previously unpublished data obtained by the late Donato Acuña-Vázquez in the eastern part of the Los Chimalapas region. In fact, not a single photo of a Resplendent Quetzal from Oaxaca was known until this present work.

Even though our team has anecdotally documented that the Resplendent Quetzal faces persecution by humans for illegal wildlife trafficking on the black market, we still consider it essential to confirm its formal presence in the Mexican state of Oaxaca. We assume that no conservation effort or initiative can be undertaken in this state without at least the most basic scientific information available. We emphasize that the Los Chimalapas region is an area of ongoing territorial conflicts and that the conservation system is voluntary, based on agreements reached in community assemblies. This is understandable, as we have also witnessed firsthand and through anecdotal evidence that the Zoque Chimalapa communities are unwilling to cede their still vast territories and common natural resources to the interests of environmental institutions and the Mexican government. At the same time, they are considered pioneers in Mexico of what is now known

as Community Conservation Areas. It is important to note that this region faces serious conservation challenges, including invasions by cattle ranchers, drug cartels, mining concessions, forest fires, illegal logging, poaching, and recent anecdotal evidence of wildlife persecution for the international black market.

Although federal Natural Protected Areas exist in the general Mesoamerican region, such as the El Triunfo Biosphere Reserve in Chiapas with 1,192 km², which is essential to guarantee the long-term viability of the Resplendent Quetzal in Mexico, we encourage more people in the region and in the state of Oaxaca to protect additional areas by converting them into voluntary community conservation areas, as has been done in Cordón del Retén in Los Chimalapas, where about 15,000 hectares are conserved through citizen and community assembly agreements. It is important to preserve the Los Chimalapas region in perpetuity, as it not only contains the most biodiverse forests in Mexico (García-Padilla et al., 2022) but also represents a significant remnant of the imperilled cloud forest, the natural habitat of the Resplendent Quetzal and many other important native and endemic species. We therefore urge all levels of government and environmental institutions to recognize, strengthen, and effectively guarantee community-based conservation processes in Oaxaca and the Los Chimalapas region. The Resplendent Quetzal joins a long list of imperilled species that could serve as a driving force and key to incentivizing the perpetual protection and conservation of community forests and all associated biodiversity.

ACKNOWLEDGEMENTS

Thanks to Beta Diversidad A.C., CONANP Istmo headquarters, Mexichem/Kaluz, and the Mesoamerican Biological Corridor (CONABIO). D. A. Carrillo-Martínez designed the map. Thanks also to Miguel Ángel García-Aguirre (Maderas del Pueblo del Sureste A.C.) for clarifying the location of Rancho Los Minne.

Literature cited



- Álvarez del Toro, M. y E. Palacios-Espinoza. 1993. Chiapas y su Biodiversidad. Chiapas 152 pp.
- Avila Hernández, M.L. 1998. The Quetzal and Its Conservation in the Mexican Southeast. Wilson Bulletin: Vol. 110: Iss. 4, Article 6. Available at: https://digitalcommons.usf.edu/wilson_bulletin/vol110/iss4/6
- Binford, L.C. 1989. A distributional survey of the birds of the Mexican state of Oaxaca. Ornithol. Monogr., 43, 1.
- García-Padilla E., V. Mata-Silva, D.L. DeSantis, A. Rocha, L.A. Fucsko, J.D. Johnson, D. Lazcano, L.D. Wilson. 2022. Biological and Cultural Diversity in the state of Oaxaca, Mexico: Strategies for Conservation among Indigenous Communities. *Biología y Sociedad*. 5(9): 48-72.
- García-Padilla, E. y P. Escalante-Pliego. 2022. Depredación de lagartijas *Abronia* por el quetzal mesoamericano (*Pharomachrus mocinno*). *Huitzil Revista Mexicana de Ornitología*. 23: 1-6
- Guirao-Cruz, R.R., L. Gama y S.L. Arriaga-Weiss. 2012. El quetzal (*Pharomachrus mocinno*) en el municipio zoque de Tapalapa, Chiapas. Pp. 32-33 En: Vázquez-Dávila y Lope Alzina (Eds.) Aves y Huertos de México. Instituto Tecnológico del Valle de Oaxaca y Carteles Editores. Primera edición, Oaxaca México.
- Hoffmeister, D. 1951. A Western Record of the Quetzal, *Pharomachrus mocinno mocinno*, and Chachalaca, *Penelopina nigra*, in Mexico. *The Auk*. 68: 507-508
- Howell, S.N. and S. Webb. 1995. A guide to the birds of Mexico and northern Central America. Oxford University Press.
- IUCN. 2025. The IUCN Red List of Threatened Species. Version 2025-2. <https://www.iucnredlist.org>. Accessed on [25-11-2025].
- MacDougall, T.B. 1971. The Chima Wilderness. *The Explorers Journal*. 49 (2): 86-103.
- Miller, A.H., H. Friedmann, L. Griscom, R.T. Moore. 1957. Distributional check-list of the birds of Mexico. Part II. *Pacific Coast Avifauna*. 33(1): 435.
- Olguín-Monroy, H., L. León Paniagua, U.M. Samper-Palacios, y. V. Sánchez-Cordero 2008. Mastofauna de la región de los Chimalapas, Oaxaca, México. Pp. 165-216 in Avances en el estudio de los mamíferos de México, vol. II. (Lorenzo-Monterrubio, C., E. Espinoza-Medinilla, y J. Ortega, eds.) Publicaciones especiales. Asociación Mexicana de Mastozoología. Ciudad de México, México.
- Palacio-Peralta, M.G., J.L. Rangel-Salazar, R.M. Viveros. 2009. Dos registros recientes del quetzal (*Pharomachrus mocinno*) en las Montañas del Este de Chiapas. *Huitzil. Revista Mexicana de Ornitología* 10: 52-55.
- Peterson, A.T., A.G. Navarro-Sigüenza, B.E. Hernández-Baños, G. Escalona-Segura, F. Rebón-Gallardo, E. Rodríguez-Ayala, E.M. Figueroa-Esquivel, L. Cabrera-García. 2003. The Chimalapas Region, Oaxaca, Mexico: a high-priority region for bird conservation in Mesoamerica. *Bird Conservation International*, 13(3): 227-253.
- Rowley, J.S. 1984. Breeding records of land birds in Oaxaca, Mexico. *Proc. West. Found. Vert. Zool.* 2: 73-224.
- SEMARNAT. 2025. Norma Oficial Mexicana NOM-059-SEMARNAT, Protección ambiental. Especies nativas de México de flora y fauna silvestres. Categorías de riesgo y especificaciones para su inclusión, exclusión o cambio. Lista de especies en riesgo. Diario Oficial de la Federación.
- Solórzano, S., M. García-Juárez, K Oyama. 2009. Diversidad genética y conservación del quetzal *Pharomachrus mocinno* en Mesoamérica. *Revista Mexicana de Biodiversidad*. 80: 241-248.
- Stotz, D.F.; J.W. Fitzpatrick, T.A. Parker, D.K. Moskovits. 1996. Neotropical Birds: Ecology and Conservation. Chicago: University of Chicago Press.

AMPLIFICACIÓN ISOTÉRMICA DE ÁCIDOS NUCLEICOS “EL FUTURO DEL DIAGNÓSTICO MOLECULAR”

✓ EVERARDO GONZÁLEZ-GONZÁLEZ¹,
MARGARITA DE LA LUZ MARTÍNEZ-FIERRO²,
IDALIA GARZA-VELOZ², GERARDO DE JESÚS
TRUJILLO-RODRÍGUEZ¹, IVÁN DELGADO-
ENCISO³, ELDA A. FLORES-CONTRERAS⁴, IRAM
PABLO RODRÍGUEZ-SÁNCHEZ¹



¹Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Ciencias Biológicas, Laboratorio de Fisiología Molecular y Estructural. Ave. Pedro de Alba s/n cruz con Ave. Manuel L. Barragán. San Nicolás de los Garza, Nuevo León, 66455 México.

²Laboratorio de Medicina Molecular, Unidad Académica de Medicina Humana y Ciencias de la Salud, Universidad Autónoma de Zacatecas, Zacatecas 98160, México

³Facultad de Medicina, Universidad de Colima, Colima, México.

⁴Departamento de Patología, Facultad de Medicina, Universidad Autónoma de Nuevo León, Francisco I. Madero y Dr. E. Aguirre Pequeño s/n, Mitras Centro, Monterrey 64460, México



Palabras claves: Diagnóstico molecular, qPCR, ADN, ARN, NASBA, LAMP, RPA

Keywords: Molecular diagnosis, qPCR, DNA, RNA, NASBA, LAMP, RPA

RESUMEN

El diagnóstico molecular es una herramienta clave con aplicaciones en salud humana, veterinaria y seguridad alimentaria, entre otras áreas. En salud humana, la pandemia de COVID-19 impulsó el uso masivo de pruebas de reacción en cadena de la polimerasa en tiempo real (también conocidas como qPCR cuando es de carácter cuantitativo), que permitieron tamizajes a gran escala y millones de diagnósticos a nivel global, consolidando a la qPCR como la técnica molecular más utilizada en la historia. Sin embargo, el acceso a estas pruebas no fue equitativo en todos los países, ya que la qPCR requiere infraestructura especializada y equipos de un costo elevado. Frente a esta limitación, la amplificación isotérmica de ácidos nucleicos ha surgido como una alternativa revolucionaria en diagnóstico molecular, permitiendo la detección rápida y precisa de patógenos y biomarcadores sin necesidad de equipo sofisticado. En este artículo, se abordan tres métodos que están marcando el futuro de la detección molecular: NASBA (Amplificación Basada en Secuencias de Ácidos Nucleicos), LAMP (Amplificación Isotérmica Mediada por Bucle) y RPA (Amplificación por Recombinasa y Polimerasa). Cada técnica ofrece ventajas en sensibilidad, especificidad y facilidad de uso, haciéndolas especialmente adecuadas para entornos de bajos recursos y diagnósticos en el punto de atención. Estas tecnologías no solo pueden revolucionar el diagnóstico, sino también permitir una respuesta rápida y efectiva ante nuevas crisis sanitarias.

ABSTRACT

Molecular diagnostics is a key tool with applications in human health, veterinary science, and food safety, among other areas. In human health, the COVID-19 pandemic spurred the widespread use of real time polymerase chain reaction (also known as qPCR when it when used in quantitative analysis) tests, enabling large-scale screenings and millions of diagnoses worldwide, establishing qPCR as the most widely used molecular technique in history. However, access to these tests was not equitable across countries, as qPCR requires specialized infrastructure and costly equipment. To address this limitation, nucleic acid isothermal amplification has emerged as a revolutionary alternative in molecular diagnostics, enabling rapid and accurate detection of pathogens and biomarkers without the need for sophisticated equipment. This article discusses three methods shaping the future of molecular detection: NASBA (Nucleic Acid Sequence-Based Amplification), LAMP (Loop-Mediated Isothermal Amplification), and RPA (Recombinase Polymerase Amplification). Each technique offers advantages in sensitivity, specificity, and ease of use, making them particularly suitable for low-resource settings and point-of-care diagnostics. These technologies not only have the potential to revolutionize diagnostics but also to enable a rapid and effective response to future health crises.

INTRODUCCIÓN

La pandemia de COVID-19, provocada por el virus SARS-CoV-2, generó la necesidad de desarrollar y establecer rápidamente tecnología en diversas áreas, principalmente en la salud humana, educación y telecomunicaciones (Clipper, 2020). Particularmente en el caso de la salud humana, se desarrollaron, evaluaron y aplicaron vacunas con tecnología de ARN mensajero, las cuales no se habían utilizado masivamente en humanos. También hubo un gran esfuerzo en la detección del SARS-CoV-2, aplicando pruebas de qPCR (Reacción en Cadena de la Polimerasa en tiempo real) de forma masiva en todo el mundo, siendo el método recomendado por la organización mundial de la salud (OMS) para diagnosticar y controlar la enfermedad. La qPCR para detectar el SARS-CoV-2 es la prueba que se ha utilizado más en la historia, estimando hasta la fecha más de 900 millones solamente en Estados Unidos de América y en México alrededor de 15 millones ("Total COVID-19 tests", <https://ourworldindata.org>) .

Es por eso que después de la pandemia de la COVID-19, la mayoría de la población había tenido contacto y sabía que era una qPCR: Una técnica sensible que permitía saber si estabas o no infectado por el SARS-CoV-2.

La PCR es una técnica desarrollada en la década de los 80 por el investigador Kary Mullis, la cual permite amplificar (multiplicar) de forma específica ácidos nucleicos y así poder detectar la presencia de ese fragmento de interés (Mullis et al., 1986). Sin embargo, la qPCR es una variante desarrollada en la década de los 90. La qPCR requiere de forma básica una ADN polimerasa termoestable (llamada *Taq*), un par de cebadores (fragmentos pequeños de ADN), sondas

marcadas con un fluorocromo (o también el uso de un intercalador como el SYBR), buffer de reacción y variaciones de temperatura para lograr esta amplificación de ácidos nucleicos, para llegar a las diferentes temperaturas es necesario de un equipo llamado termociclador, el cual tiene la capacidad de controlar el tiempo y la temperatura.

El termociclador es una de las principales limitaciones del diagnóstico por qPCR, debido a su alto costo, lo cual impide que todos los países tengan la capacidad de equipar sus laboratorios clínicos con esta tecnología. Esto se traduce en una disparidad significativa en el acceso a la tecnología de diagnóstico molecular, siendo un factor importante en las diferencias en la cantidad de pruebas de qPCR para SARS-CoV-2 realizadas en México y E.U.A.

La falta de acceso a estos equipos, reactivos (polimerasas) y personal especializado en ciertos países ha sido un obstáculo para una detección oportuna y masiva, subrayando la necesidad de desarrollar alternativas más accesibles para el diagnóstico molecular. Sin embargo, existe una amplia variedad de kits comerciales basados en qPCR para la detección de diversos patógenos. La Tabla 1 presenta algunos ejemplos de patógenos detectables mediante esta técnica, junto con el nombre del kit correspondiente y su fabricante.

Teniendo en cuenta la necesidad de simplificar la qPCR, se han desarrollado tecnologías alternativas bajo el mismo principio de la amplificación de ácidos nucleicos, pero sin necesidad de variar la temperatura evitando el uso del termociclador. Este tipo de pruebas se han denominado Técnicas de Amplificación Isotérmica y su principal atractivo es que con una temperatura

Tabla 1. Kits comerciales basados en qPCR para la detección de patógenos

Patógeno	Kit Comercial	Fabricante
Salmonella spp.	Condagene® Salmonella	Condalab (condalab.com)
Listeria monocytogenes	Condagene® Listeria monocytogenes	Condalab
<i>Escherichia coli</i> O157:H7	Condagene® E. coli O157:H7	Condalab
Campylobacter spp.	Condagene® Campylobacter	Condalab
Staphylococcus aureus	Condagene® Staphylococcus aureus	Condalab
Norovirus GI/GII	Vitassay qPCR Norovirus	Vitassay (vitassay.com)
Rotavirus A	Vitassay qPCR Rotavirus A	Vitassay
Adenovirus	Vitassay qPCR Adenovirus	Vitassay
SARS-CoV-2	Reliance SARS-CoV-2 RT-PCR Kit	Bio-Rad (bio-rad.com)
Influenza A/B y RSV	COVID-19, Flu A/B, RSV Multiplex One-Step RT-qPCR Kit	NZYTech (nzytech.com)
Virus del Ébola	RealStar® Filovirus Screen RT-PCR Kit 1.0	Altona Diagnostics (altona-diagnostics.com)

constante se pueden amplificar los ácidos nucleicos. Existen diferentes técnicas de amplificación isotérmicas, entre las más populares están NASBA (Amplificación Basada en Secuencias de Ácidos Nucleicos), LAMP (Amplificación Isotérmica Mediada por Bucle) y RPA (Amplificación por Recombinasa y Polimerasa). En la Figura 1 se muestra un resumen de las técnicas mencionadas con sus respectivas principales características

NASBA

La técnica de NASBA es la pionera en tecnología de amplificación isotérmica de ácidos nucleicos. En 1991 el investigador J. Compton publicó en la revista Nature la tecnología de NASBA. El fundamento técnico de NASBA se basa en el proceso de replicación retroviral, en un principio se enfocaba a la detección de moléculas de ARN (en la actualidad se ha adaptado a ADN). Para lograr una amplificación de ácidos nucleicos por medio de NASBA es necesario utilizar 3 enzimas: transcriptasa inversa (AMV), T7 RNA polimerasa y RNasa H, además de un par de cebadores específicos a la secuencia a detectar. Por último, para llevar a cabo la reacción de NASBA se requiere de una incubación a una temperatura constante de 41°C durante 2 horas (Compton, 1991).

Como se mencionó previamente NASBA es una tecnología que tiene más de 30 años y se han publicado diversas pruebas para la detección de patógenos, por ejemplo: la detección de VPH (Virus del Papiloma Humano) (Smits et al., 1995), la detección de norovirus (Mao et al., 2024), o la detección de SARS-CoV-2 (Kia et al., 2023).

LAMP

La tecnología isotérmica de LAMP fue desarrollada por Notomi y colaboradores en el año 2000 y actualmente es la más utilizada en el mundo en el área de diagnóstico isotérmico (Becherer et al., 2020). Se han publicado una basta variedad de pruebas para la detección de patógenos entre ellos el SARS-CoV-2 (González-González et al., 2021), EBOV (virus del Ébola) (Kurosaki et al., 2016) y VIH (virus de la Inmunodeficiencia Humana) (Curtis et al., 2018). Además, se encuentran disponibles en el mercado una gama de pruebas basadas en esta tecnología (Becherer et al., 2020). El fundamento general de LAMP se basa en emplear una polimerasa (*Bst*) que funciona a una temperatura de 60°C, en conjunto con 4 cebadores específicos para una región de ADN (a diferencia del qPCR que solo usa 2) y de esta forma se puede sintetizar fragmentos de ADN en incubaciones de 30 a 60 minutos (Notomi et al., 2000).





Técnicas Isotérmicas				
	qPCR	NASBA	LAMP	RPA
Termociclador				
No. de Enzimas	1	3	1	4
Temperatura	95°C 60°C 72°C	41 °C	60 °C	37 °C
Tiempo	60-120 min (Depende de la polimerasa)	120 min	30-60 min	60 min

Figura 1. Comparativa de técnicas moleculares utilizadas en el diagnóstico. Características principales de las técnicas qPCR (Reacción en Cadena de la Polimerasa en tiempo real), NASBA (Amplificación Basada en Secuencias de Ácidos Nucleicos), LAMP (Amplificación Isotérmica Mediada por Bucle) y RPA (amplificación por recombinasa y polimerasa), destacando la necesidad de utilizar el equipo necesario en la qPCR como el termociclador, cantidad de enzimas requeridas para procesar la reacción de amplificación de ácidos nucleicos, la temperatura que se requiere para que las enzimas funcionen y su respectiva duración de la reacción.

Recientemente LAMP ha tenido un crecimiento en su uso debido a que se han desarrollado algunas presentaciones comerciales de la polimerasa *Bst*, las cuales están contenidas en soluciones colorimétricas, permitiendo observar la presencia de la secuencia a detectar (es decir, el ADN del patógeno) mediante un cambio de color en la solución, teniendo una forma sencilla de detección. Esto simplifica significativamente el diagnóstico molecular, ya que solo se necesita contar con un recipiente (baño agua) que mantenga la temperatura a 60°C durante 30 min y observar si la mezcla de reacción vira de rojo a amarillo, de esta forma podemos determinar la presencia o ausencia del ADN que se está buscando. Este tipo de técnicas habilitan la capacidad de hacer diagnóstico molecular de alta sensibilidad de forma oportuna sin necesidad de infraestructura costosa como lo son los laboratorios moleculares y de los equipos como los termocicladores.

RPA

La amplificación por recombinasa polimerasa o también llamada RPA, es de las técnicas isotérmicas más modernas, siendo desarrollada en 2006 por Olaf Piepenburg y colaboradores. Esta tecnología isotérmica utiliza al igual que la qPCR un par de cebadores específicos y complementarios a una región de ADN, pero la diferencia es que utiliza un conjunto de proteínas (una recombinasa, una proteína de unión a ADN, una proteína accesoria y una ADN polimerasa). La tecnología de RPA respecto a la temperatura de trabajo es la más atractiva debido a que se puede incubar a temperatura ambiente constante, porque el sistema es eficiente en un rango entre 20°C a 42°C (Piepenburg et al., 2006).

Normalmente las pruebas de RPA tienen una duración de 60 minutos para lograr la amplificación de los fragmentos de ADN y se han publicado una amplia variedad de pruebas basada en RPA para la detección de patógenos entre los que destacan SARS-CoV-2 (Zingg et al., 2023), ZIKV (Zika) (Wand et al., 2018) y *Mycoplasma bovis* (Li et al., 2021).

En cuanto a la revelación de los resultados de RPA, se han desarrollado diversas alternativas para la detección de muestras positivas a patógenos. Estas van desde metodologías tradicionales, como la electroforesis en gel de agarosa, hasta enfoques más recientes, como el uso de colorantes o intercaladores fluorescentes, que permiten la detección visual del patógeno sin necesidad de equipos especializados. La implementación de estas técnicas facilita el diagnóstico en prácticamente



Figura 2. Representación de un laboratorio de diagnóstico molecular en tiempos de pandemia (Imagen generada con inteligencia artificial).

cualquier lugar, sin requerir infraestructura costosa (Tan et al., 2022).

PERSPECTIVAS

La reciente pandemia de COVID-19 ha evidenciado la necesidad urgente de herramientas de diagnóstico accesibles y eficaces. Aunque la tecnología qPCR ha sido fundamental, su complejidad y costo limitan su disponibilidad en muchas regiones (Figura 2. Representación de un laboratorio en una pandemia). Las tecnologías de amplificación isotérmica de ácidos nucleicos ofrecen una alternativa prometedora, con aplicaciones que van más allá de la detección de enfermedades infecciosas, abarcando también la identificación de enfermedades crónicas, cáncer, entre otras. Gracias a su bajo costo, simplicidad y portabilidad, estas tecnologías pueden ser implementadas en entornos con recursos limitados, como comunidades rurales o países en desarrollo. No obstante, su adopción enfrenta desafíos, entre ellos, asegurar la precisión y consistencia de los resultados en contextos diversos, así como fomentar su aceptación en los sistemas de salud locales. Si se superan estos retos, estas tecnologías podrían no solo revolucionar la respuesta a futuras crisis sanitarias, sino que abren el camino hacia un futuro de atención médica más equitativa y resiliente.

Literatura citada



- Becherer, L., Borst, N., Bakheit, M., Frischmann, S., Zengerle, R., Von Stetten, F., 2020. Loop-mediated isothermal amplification (LAMP) – review and classification of methods for sequence-specific detection. *Analytical Methods* 12, 717–746. <https://doi.org/10.1039/C9AY02246E>
- Clipper, B., 2020. The Influence of the COVID-19 Pandemic on Technology: Adoption in Health Care. *Nurse Lead* 18, 500. <https://doi.org/10.1016/J.MNL.2020.06.008>
- Compton, J., 1991. Nucleic acid sequence-based amplification. *Nature* 350, 91–92. <https://doi.org/10.1038/350091A0>
- Curtis, K.A., Morrison, D., Rudolph, D.L., Shankar, A., Bloomfield, L.S.P., Switzer, W.M., Owen, S.M., 2018. A multiplexed RT-LAMP assay for detection of group M HIV-1 in plasma or whole blood. *J Virol Methods* 255, 91–97. <https://doi.org/10.1016/J.JVIROMET.2018.02.012>
- González-González, E., Lara-Mayorga, I.M., Rodríguez-Sánchez, I.P., Zhang, Y.S., Martínez-Chapa, S.O., Santiago, G.T., Alvarez, M.M., 2021. Colorimetric loop-mediated isothermal amplification (LAMP) for cost-effective and quantitative detection of SARS-CoV-2: the change in color in LAMP-based assays quantitatively correlates with viral copy number. *Analytical Methods* 13, 169–178. <https://doi.org/10.1039/D0AY01658F>
- Kia, V., Tafti, A., Paryan, M., Mohammadi-Yeganeh, S., 2023. Evaluation of real-time NASBA assay for the detection of SARS-CoV-2 compared with real-time PCR. *Ir J Med Sci* 192, 723–729. <https://doi.org/10.1007/S11845-022-03046-2>
- Kurosaki, Y., Magassouba, N., Oloniniyi, O.K., Cherif, M.S., Sakabe, S., Takada, A., Hirayama, K., Yasuda, J., 2016. Development and Evaluation of Reverse Transcription-Loop-Mediated Isothermal Amplification (RT-LAMP) Assay Coupled with a Portable Device for Rapid Diagnosis of Ebola Virus Disease in Guinea. *PLoS Negl Trop Dis* 10, e0004472. <https://doi.org/10.1371/JOURNAL.PNTD.0004472>
- Li, R., Wang, Jinfeng, Sun, X., Liu, L., Wang, Jianchang, Yuan, W., 2021. Direct and Rapid Detection of *Mycoplasma bovis* in Bovine Milk Samples by Recombinase Polymerase Amplification Assays. *Front Cell Infect Microbiol* 11. <https://doi.org/10.3389/FCIMB.2021.639083>
- Mao, Z., Lei, H., Chen, R., Ren, S., Liu, B., Gao, Z., 2024. CRISPR/Cas13a analysis based on NASBA amplification for norovirus detection. *Talanta* 280. <https://doi.org/10.1016/J.TALANTA.2024.126725>
- Mullis, K., Faloona, F., Scharf, S., Saiki, R., Horn, G., Erlich, H., 1986. Specific enzymatic amplification of DNA in vitro: the polymerase chain reaction. *Cold Spring Harb Symp Quant Biol* 51 Pt 1, 263–273. <https://doi.org/10.1101/SQB.1986.051.01.032>
- Notomi, T., Okayama, H., Masubuchi, H., Yonekawa, T., Watanabe, K., Amino, N., Hase, T., 2000. Loop-mediated isothermal amplification of DNA. *Nucleic Acids Res* 28. <https://doi.org/10.1093/NAR/28.12.E63>
- Piepenburg, O., Williams, C.H., Stemple, D.L., Armes, N.A., 2006. DNA Detection Using Recombination Proteins. *PLoS Biol* 4, e204. <https://doi.org/10.1371/JOURNAL.PBIO.0040204>
- Smits, H.L., Van Gemen, B., Schukink, R., Van Der Velden, J., Tjong-a-hung, S.P., Jebbink, maarten F., Ter Schegget, J., 1995. Application of the NASBA nucleic acid amplification method for the detection of human papillomavirus type 16 E6-E7 transcripts. *J Virol Methods* 54, 75–81. [https://doi.org/10.1016/0166-0934\(95\)00032-P](https://doi.org/10.1016/0166-0934(95)00032-P)
- Tan, M., Liao, C., Liang, L., Yi, X., Zhou, Z., Wei, G., 2022. Recent advances in recombinase polymerase amplification: Principle, advantages, disadvantages and applications. *Front Cell Infect Microbiol* 12, 1019071. <https://doi.org/10.3389/FCIMB.2022.1019071/BIBTEX>
- Total COVID-19 tests, URL <https://ourworldindata.org/grapher/full-list-total-tests-for-covid-19?tab=table&-facet=none&country=ECU~IND~IDN~ITA~SEN~NZL~MEX#-explore-the-data> (accessed 10.24.24).
- Wand, N.I.V., Bonney, L.C., Watson, R.J., Graham, V., Hewson, R., 2018. Point-of-care diagnostic assay for the detection of Zika virus using the recombinase polymerase amplification method. *J Gen Virol* 99, 1012. <https://doi.org/10.1099/JGV.0.001083>
- Zingg, J.-M., Yang, Y.-P., Seely, S., Joshi, P., Roshid, M.H.O., Iribarren Latasa, F., O'Connor, G., Alfaro, J., Riquelme, E., Bernales, S., Dikici, E., Deo, S., Daunert, S., 2023. Rapid isothermal point-of-care test for screening of SARS-CoV-2 (COVID-19). *Aspects of Molecular Medicine* 1, 100002. <https://doi.org/10.1016/J.AMOLM.2023.100002>

SOBRE LOS AUTORES



ALEJANDRO ANTONIO ARAGÓN MORENO Investigador Asociado, El Colegio de la Frontera Sur, Unidad Chetumal. Palinólogo con experiencia en paleoecología, paleotempestología y melisopalinología. Miembro del Sistema Nacional de Investigadoras e Investigadores de la SECIHTI, Nivel I.

alejandro.aragon@ecosur.mx / alejandro.aragon@ecosur.mx

ANA LAURA LARA RIVERA

Actualmente profesora asociada de tiempo completo de la Facultad de Ciencias Biológicas de la Universidad Autónoma de Nuevo León. Bióloga por el Instituto Tecnológico de Altamira. Maestría en biotecnología genómica y Doctorado en ciencias en Biotecnología por el Centro de Biotecnología Genómica del Instituto Politécnico Nacional. Formación de recursos humanos y publicaciones científicas en genética poblacional de poblaciones domésticas y silvestres, marcadores moleculares y mejoramiento genético. Miembro del Sistema Nacional de Investigadores desde 2016. Actualmente SNI I.

alarar@uanl.edu.mx

ANA PAOLA MARTÍNEZ FALCÓN Doctora en Biodiversidad: conservación y gestión de las especies y sus hábitats por parte de la Universidad de Alicante. Maestría en Recursos Bióticos y Licenciatura en biología por la Universidad Autónoma del estado de Hidalgo. Ha impartido numerosos cursos, entre los que destacan materias como análisis de la biodiversidad, entomología, redes ecológicas y análisis estadísticos empleando R software. Es especialista en medición de la biodiversidad, ecología de comunidades, procesos de descomposición de tejidos vegetales e interacciones planta-animal empleando el enfoque de redes complejas. Ha realizado estancias de Investigación en la Universidad de Edimburgo, Escocia y en el Instituto Cavanilles de Biología Evolutiva, Valencia, España. Realizó tres estancias posdoctorales, una en el Centro de Investigaciones en Ecosistemas, UNAM, México en, una segunda estancia posdoctoral en el Instituto de Ecología A.C. México y una tercera estancia en el Centro de Investigaciones Biológicas, UAEH, México. Actualmente, profesora de tiempo completo en la Universidad Autónoma del estado de Hidalgo. Ha realizado trabajo de campo en selvas tropicales mexicanas, bosques templados, zonas semidesérticas y ambientes mediterráneos españoles. Cuenta con 44 publicaciones en revistas JCR. Ha sido revisora de las revistas PLoS ONE, PeerJ, Insect Conservation and Diversity, Biodiversity and Conservation, entre otras. Nivel 1 del SNII.

ana_martinez6052@uaeh.edu.mx

ANTONIO GUZMÁN VELASCO Biólogo, Maestro en Ciencias en Manejo de Vida Silvestre y Doctor en Ciencias por la Universidad Autónoma de Nuevo León (UANL). Es Investigador Nivel I en el Sistema Nacional de

Investigadores (SNI), cuenta con Perfil PRODEP y es miembro del Cuerpo Académico Consolidado en Ecología y Biodiversidad. Es profesor de tiempo completo en la Facultad de Ciencias Biológicas de la UANL, impartiendo materias sobre biodiversidad, ecología y gestión ambiental. Ha publicado 18 artículos científicos y dirigido múltiples tesis de licenciatura y posgrado. Cuenta con amplia experiencia en conservación ambiental, participando en proyectos de monitoreo de fauna y restauración de ecosistemas. Ha sido asesor en competencias científicas internacionales, destacando el IGEM Boston 2014, donde su equipo obtuvo medalla de plata. Ha ocupado cargos como: Director de la Facultad de Ciencias Biológicas de la UANL (2012-2018) y Coordinador General de Parques y Vida Silvestre de Nuevo León (2020). Actualmente, es jefe del Laboratorio de Biología de la Conservación y Desarrollo Sostenible de la UANL y colabora en el Programa de Desarrollo Urbano de Monterrey 2040.

anguve@gmail.com

ARTURO SÁNCHEZ GONZÁLEZ Licenciatura en Biología y Maestría en Ciencias en Biología de Recursos Vegetales en la Universidad Nacional Autónoma de México, Doctorado en Botánica en el Colegio de Postgraduados. Desde el año 2005 es Profesor-Investigador Titular "C" en el Área Académica de Biología de la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo. Imparte las asignaturas de Biología de Briofitas y Pteridofitas, Análisis Cuantitativo de Comunidades Vegetales, Ecología, Fundamentos de Metodología de la Investigación y Biodiversidad. Desarrolla proyectos sobre patrones de riqueza y distribución de distintos grupos de plantas, principalmente de Pteridofitas (helechos y lycopodios), Briofitas y sobre la estructura y la composición de poblaciones y comunidades vegetales. Entre los años 2006 y 2008 fue coordinador del Doctorado en Ciencias en Biodiversidad y Conservación. Es miembro del Sistema Nacional de Investigadores desde el año 2005 y profesor con perfil deseable PRODEP desde el año 2006, ambos reconocimientos en forma ininterrumpida. Entre el año 2017 y 2018 fue líder de grupo de investigación "Biotecnología para la Conservación de la Biodiversidad" y entre 2018 y 2019 fue líder del Cuerpo Académico en Consolidación: "Conservación Biológica". Es miembro activo del núcleo básico del Doctorado en Ciencias en Biodiversidad y Conservación y de la Maestría en Gestión Ambiental. Ha dirigido 20 tesis de licenciatura, nueve de maestría y diez de doctorado, y ha sido responsable de dos investigadores en estancias posdoctorales. Entre los años 2016 y 2017 fue editor del libro: Biodiversidad del estado de Hidalgo (una obra de relevancia a nivel estatal), ha publicado dos libros, 14 capítulos de libro, 11 artículos de divulgación, 65 artículos en revistas indexadas y ha participado en más de 50 congresos nacionales e internacionales. Es dictaminador de proyectos de investigación y de artículos científicos en revistas nacionales e internacionales.

arturosg@uaeh.edu.mx

AURELIO RAMÍREZ BAUTISTA Es Biólogo, egresado de la Universidad Veracruzana. Maestría y doctorado en la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). Posdoctorado por la Universidad de Oklahoma, USA. Su investigación abarca temas de ecología, comunidades, biogeografía, conservación, evolución de historias de vida en anfibios y reptiles de México; fue presidente de la Sociedad Herpetológica Mexicana, A. C., Editor en jefe del Boletín de la Sociedad Herpetológica Mexicana, A. C., Editor asociado de las Revistas Mesoamerican Herpetology, Amphibia & Reptile Conservation y, de ISR-Zoology; revisor par de más de 90 revistas científicas del Mundo; revisor de proyectos de ciencia básica CONAHCYT, becas CONAHCYT, Investigadores e Investigadoras por México; evaluador de programas educativos de posgrado PNPC; evaluador de proyectos Promep y de Perfil deseable Promep. Fue profesor investigador de la UNAM; profesor de la Universidad Autónoma del estado de Hidalgo (UAEH); ha impartido las materias de ecología de poblaciones, biología y ecología de la reproducción de anfibios y reptiles, demografía, comunidades, y herpetología. Es autor y coautor de 346 trabajos; entre estos, 163 en revistas JCR, notas científicas arbitradas (139), capítulos de libros (30); es autor de 14 libros. Ha dirigido 55 tesis de licenciatura, 24 de maestría, 9 de doctorado; ha sido tutor externo (external advisor) de tres estudiantes de doctorado del extranjero (USA). Ha recibido varios reconocimientos en México y en el extranjero, como el premio "Helia Bravo Hollis" (UNAM), premio "Donald Tinkle" por la SWAN (USA), es perfil PRODEP. Fue líder del Cuerpo Académico de Ecología, actualmente pertenece al CA Consolidado de Conservación Biológica (CACB); se le dedicó el nombre científico de una nueva especie de lagartija (*Lepidophyma ramirezi*); Herpetologica, 77(4): 320-334, URL: <https://doi.org/10.1655/Herpetologica-D-21-00019.1>; se le otorgó la distinción de SNI Nivel 3 Emérito por CONAHCYT; distinción con el premio Spiritus Universitatis por la UAEH, marzo, 2023.

aurelior@uaeh.edu.mx

BERTHA PATRICIA ESCALANTE PLIEGO Nació en la Ciudad de México el 7 de abril de 1957. Estudió la carrera de Biología y obtuvo la Maestría en Ciencias (Biología) en la Facultad de Ciencias, UNAM. En la City University of New York cursó el Doctorado en el Programa de Ecología y Biología Evolutiva. Actualmente funge como Investigadora Titular B TC (SNI II y PRIDE C) en el Instituto de Biología, UNAM. Ha ofrecido 25 cursos en licenciatura y posgrado y ha dirigido tesis a biólogos (22), maestros en ciencias (13) y doctorados (3) y también ha dirigido 33 servicios sociales y recibido 10 estudiantes en intercambio académico. Ha sido tutora principal del Posgrado en Ciencias Biológicas, UNAM, desde 1995, en el de Maestría en Ciencias de la Producción y de la Salud de la Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia y en el de Ciencias de la Sustentabilidad desde 2018. Usando al grupo Aves como objeto de estudio ha hecho contribuciones a la genética, evolución, sistemática, filogeografía, ecología, distribución, faunística y conservación de aves mexicanas y americanas. Cuenta con 76 publicaciones científicas, 50

artículos indizados, coautora de 21 capítulos y 8 libros. Ha sido editora asociada de diversas publicaciones especializadas como Neotropical Ornithology y The Auk. Actualmente es editora asociada de las revistas Mitochondrial DNA partB y revista Huitzil, de la Sociedad para el Estudio y Conservación de las Aves de México AC. En cuanto a actividades de difusión ha ofrecido cerca de 50 conferencias, participado en numerosos congresos, escrito 12 artículos de divulgación, ofrecido numerosas entrevistas, participado en cerca de 15 videos. También ha sido curadora de la Colección Nacional de Aves desde 1992. Fue miembro del Consejo Universitario (2003-2004), jefa del Departamento de Zoología del Instituto de Biología (2003-2011), miembro representante suplente del personal académico del Instituto de Biología al Consejo Académico del Área de las Ciencias Biológicas, Químicas y de la Salud (desde 2016-2019) y miembro del Programa de Apoyos para la Superación del Personal Académico (desde 2017). Actualmente también es presidenta de Bosque Antiguo, que es una asociación para la conservación de las aves que se fundó 1998. A partir del año 2013 inició el "Proyecto de Reintroducción de la Guacamaya Roja en Los Tuxtlas, Veracruz". En este proyecto desarrolló habilidades de trabajo en equipo y de conducción de equipos transdisciplinarios. Coordina en su trabajo de campo, además de estudiantes en servicio social o trabajo profesional, personas de las localidades donde se ejecuta el proyecto que han sido capacitados en trabajo de conservación y agroecológico. Ha establecido alianzas con organismos de gobierno como la Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (Dirección de la Reserva de la Biosfera Los Tuxtlas) y el municipio de San Andrés Tuxtla. También ha establecido alianzas de largo alcance con Xcaret y con la Reserva Ecológica Nanciyaga. Con comunidades rurales también ha establecido alianzas para utilizar a la guacamaya roja como especie emblemática para actividades de reforestación o manejo sustentable de recursos, en particular destacan los ejidos Benito Juárez (a partir del 2017) y el de Dos Amates (a partir del 2018). Fue presidenta de CIPAMEX (Sociedad para el Estudio y Conservación de las Aves en México, 1992-1998), y de la Sociedad de Ornitología Neotropical (2003-2007). Obtuvo el nombramiento de "aliado corresponsal" de la American Ornithologists' Union en el 2005, invitada al Comité Ejecutivo de la International Ornithologists' Union (IOU) desde el 2006. Se le otorgó la Medalla Miguel Álvarez del Toro por su labor de vida en el estudio y conservación de las aves habitando en México por CIPAMEX en octubre de 2007. Además, ha sido miembro del Sistema Nacional de investigadores (1992-1999 y 2009 a la fecha).

tilmatura@ib.unam.mx

DIANA RESÉNDEZ-PÉREZ Químico Bacteriólogo Parasitólogo, Maestra en Ciencias con Acentuación en Biología Celular y Doctora en Ciencias con Acentuación en Biología Molecular e Ingeniería Genética. Grados otorgados por la Universidad Autónoma de Nuevo León. Posdoctorado en el laboratorio del Prof. Dr. Walter Gehring. Departamento de Biología Celular, Biozentrum, Universidad de Basilea, Suiza. Subdirectora Académica, profesora e investigadora de la Facultad de Ciencias Biológicas de la UANL. Imparte los cursos de Biología del Desarrollo. Forma parte del Posgrado con Orientación en

Inmunobiología en la Facultad de Ciencias Biológicas. Su línea de investigación es control genético del desarrollo en *Drosophila melanogaster*, expresión diferencial de genes Hox en cáncer, regulación genética en *D. melanogaster* y cáncer. Miembro del Sistema Nacional de Investigadores Nivel II.

diana.resendezpr@uanl.edu.mx

DONATO ACUCA VAZQUEZ † (1969-1998) Prominente ornitólogo y etno-biólogo oaxaqueño quien falleció víctima de un ataque de abejas africanizadas trabajando en la región de los Chimalapas, Oaxaca en México.

DULCE MARÍA GALVÁN HERNÁNDEZ Egresada de la Licenciatura en Biología de la Universidad Veracruzana región Xalapa. Realizó sus estudios de doctorado en Ciencias Ecología y Biotecnología del Instituto de Biotecnología y Ecología Aplicada (INBIOTECA) de la Universidad Veracruzana. Posteriormente realizó su estancia posdoctoral en el Centro de Investigaciones Biológicas del Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería de la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, donde actualmente es Profesora de Tiempo Completo, Titular A. Desarrolla la Línea de Generación y Aplicación del Conocimiento de Biotecnología y Conservación de los Recursos Fitogenéticos, en áreas como la morfometría, genética de poblaciones, cultivo de tejidos vegetales, propagación de especies, ecología y restauración ecológica. Es miembro del Sistema Nacional de Investigadores Nivel I y cuenta con perfil deseable PRODEP.

dulce_galvan11212@uaeh.edu.mx

EDSON A. ALVAREZ-ALVAREZ Consejo de Ciencia, Tecnología e Innovación del Estado de Guerrero. Biólogo, Maestro en recursos naturales y ecología (RNYE) y candidato a doctor en RNYE por la UAGro. Realizó estancias de investigación en el Instituto de Ecología A.C., en el Laboratorio Mixto Internacional ELDORADO y la Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia de la UNAM. Es miembro del Padrón Estatal de Investigadores del Estado de Guerrero desde el 2022. Ha publicado dos capítulos de libro, 28 artículos científicos y de divulgación en revistas y editoriales de alto impacto. Está interesado en analizar los patrones ecológicos y procesos naturales y antropogénicos que dan forma a las poblaciones y comunidades de plantas y animales en diferentes escalas espaciales y temporales a partir del uso y aplicación de metodologías novedosas en diferentes áreas del conocimiento, como análisis de diversidad, análisis de isótopos estables y modelos de nicho ecológico.

alvarez.ea@outlook.com

EDUARDO AGUSTÍN-GODÍNEZ

dr.agustin.patologia@gmail.com

EDUARDO FIDEL HÉCTOR ARDISANA Profesor Titular de la Universidad Técnica de Manabí. Es coordinador académico de la Maestría en Biotecnología, mención Biotecnología Vegetal, con sede en la Escuela de

Posgrado y la Facultad de Ingeniería Agronómica de dicha universidad. Ha dirigido más de 15 tesis de maestría y doctorado, y tiene más de 100 artículos científicos, libros y capítulos de libros, más de la mitad de ellos en el área de biotecnología vegetal.

ehectorardisana@gmail.com

ELDA A. FLORES-CONTRERAS Es una investigadora mexicana especializada en biología molecular, biotecnología y bioquímica aplicada. Actualmente forma parte del Departamento de Bioquímica y Medicina Molecular de la Facultad de Medicina de la Universidad Autónoma de Nuevo León (UANL). Es Doctora en Ciencias con orientación en Biología Molecular e Ingeniería Genética por la UANL y miembro del Sistema Nacional de Investigadoras e Investigadores (SNII), reconocimiento que destaca su contribución académica y científica en México. Su producción científica incluye investigaciones sobre tecnologías isotérmicas para detección de virus como HPV, uso de biomasa de algas para alimentación acuícola, y aplicaciones sustentables de residuos agrícolas, entre otros temas interdisciplinarios en biotecnología y salud.

elda.florescn@uanl.edu.mx

ELÍ GARCÍA-PADILLA Es biólogo social y fotógrafo profesional con 18 años de experiencia en el estudio formal y la fotodocumentación de la diversidad biológica y cultural de México. Ha publicado 4 libros y más de 150 contribuciones formales –con más de mil 700 citas– en torno al conocimiento, comunicación de la ciencia y conservación de la biodiversidad mesoamericana. Desde el año de 2006 ha invertido esfuerzo en la exploración de Oaxaca y Chiapas que son las entidades más biodiversas y multiculturales de México. En 2017 comenzó a adentrarse en la mítica región de Los Chimalapas, en el Istmo de Tehuantepec, que es la de mayor riqueza biológica de todo México bajo un esquema de conservación social comunitario. Al presente está inmerso en la exploración de la utopía conocida como Los Pueblos Mancomunados en la Sierra Madre de Oaxaca con el proyecto con perspectiva comunitaria intutulado “biodiversidad de Pueblos Mancomunados”. Adicionalmente colaborando con los actores y empresas comunitarias en la región de La Chinantla en la Sierra Madre de Oaxaca, que es el remanente de bosque mesófilo de montaña más importante de México. Ha impartido varios talleres de fotografía de naturaleza y del patrimonio biocultural de México. Es experto de la Red Tox y ha impartido varios talleres de identificación y manejo de serpientes venenosas y protocolo de acción prehospitalaria del accidente ofídico en contextos comunitarios. Su obra fotográfica ha sido publicada en revistas de prestigio como National Geographic en español y Cuartoscuro. A partir del año 2020 a la fecha co-fundó la iniciativa “Biodiversidad Mesoamericana” con el objetivo de construir colectivamente comunidad en torno a la divulgación de la riqueza más importante de México que es su biodiversidad y sus culturas originarias. Sus columnas de opinión sobre temas socio-ambientales, pueblos originarios y biodiversidad son publicadas regularmente en Oaxaca Media, la Jornada Ecológica, la Jornada Maya y el Suplemento Ojarasca de La Jornada.

eligarciapadilla1986@gmail.com

ERNESTO I. BADANO Licenciado en Ciencias Biológicas por la Universidad Nacional de Salta (Argentina) y Doctor en Ciencias Biológicas por la Universidad de Concepción (Chile). Investigador Titular del Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica (IPICYT) y Nivel III en el Sistema Nacional de Investigadoras e Investigadores (SNI). Investiga los efectos de las invasiones biológicas, el cambio climático y el cambio de uso del suelo sobre ecosistemas naturales y agroecosistemas. Cuenta con más de 90 publicaciones en revistas indizadas y más de 10 publicaciones en revistas de divulgación.

ernesto.badano@ipicyt.edu.mx

ESTEBAN LÓPEZ SAMPEDRO Tiene una licenciatura en Química Industrial por la Universidad Veracruzana y realizó su maestría en la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). Recientemente realizó un doble doctorado en Química acuática y en Biomoléculas y Biomedicina, por la UNAM y por la Universidad de Cádiz (España), respectivamente. Ha realizado investigación en diversas áreas de la bioquímica desde hace 10 años, incluyendo el aislamiento de productos naturales, elucidación química e identificación de compuestos bioactivos y desarrollo de metodologías espectrométricas. Su investigación tiene un fuerte enfoque en la colaboración y ha participado en proyectos con instituciones a nivel nacional, internacional, así como con la industria. Tiene una amplia experiencia en técnicas de laboratorio, escritura científica, docencia y divulgación y difusión científica. Cuenta con 10 años de experiencia en docencia a nivel de licenciatura y posgrado y 3 años en la industria.

esteban.sampedro@ciencias.unam.mx

EVERARDO GONZÁLEZ-GONZÁLEZ Es un investigador mexicano en biología molecular, diagnóstico y genómica. Es Investigador egresado de la Facultad de Ciencias Biológicas de la Universidad Autónoma de Nuevo León (UANL) y miembro del Sistema Nacional de Investigadores (Nivel I) de México por su contribución científica. Su trabajo se centra en biología molecular aplicada al diagnóstico de enfermedades infecciosas, incluyendo el desarrollo de métodos portátiles y accesibles para la detección de patógenos como SARS-CoV-2, así como enfoques genéticos y genómicos relevantes para la salud pública. González-González ha publicado investigaciones sobre diagnóstico rápido y económico de virus, plataformas de amplificación molecular y herramientas genómicas, destacándose por su enfoque en soluciones prácticas y de punto de atención.

dnarnaprot@gmail.com

FRANCISCO A. GUERRA-COSS Doctor en Ciencias por el Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica (IPICYT). Miembro del Sistema Nacional de Investigadoras e Investigadores (SNI) con Nivel Candidato. Su investigación se enfoca en evaluar los efectos que tiene el cambio climático, las invasiones biológicas, y los cambios en el uso del suelo en

especies vegetales terrestres. Ha publicado 1 capítulo de libro y 4 artículos en revistas indizadas.

francisco.guerra@ipicyt.edu.mx

GERALD ALEXANDER ISLEBE Biólogo con doctorado de la Universidad de Amsterdam, Holanda, (1996), actualmente es Investigador Titular C sobre temas de paleoecología y ecología vegetal en El Colegio de la Frontera Sur Unidad Chetumal. Miembro del Sistema Nacional de Investigadores nivel 3 y Miembro de la Academia Mexicana de Ciencias. Ha publicado más de 130 artículos y capítulos de libros científicos, fue editor de 5 libros.

gislebe@ecosur.mx

GERARDO DE JESÚS TRUJILLO-RODRÍGUEZ Es investigador y profesor mexicano especializado en entomología médica y biología molecular de insectos. Es Profesor-Investigador en la Facultad de Ciencias Biológicas de la Universidad Autónoma de Nuevo León (UANL) y miembro del Sistema Nacional de Investigadores (SNI). Su trabajo se enfoca en el estudio molecular y fisiológico de insectos de importancia sanitaria y agrícola, incluyendo resistencia a insecticidas, microbiota de vectores y aplicaciones moleculares para el control y diagnóstico en salud pública, con contribuciones relevantes en investigación y formación académica.

entogerry36@gmail.com

GRACIELA ALCÁNTARA SALINAS Nacida en la ciudad de México es bióloga egresada de la Facultad de Ciencias de la UNAM; donde también cursó la Maestría en Ciencias (Biología Animal), posteriormente realizó estudios de Doctorado en Etnobiología en la Universidad de Kent del Reino asesorada por el Prof. Roy Ellen. Cuenta con una estancia posdoctoral en el CRIM de la UNAM. Actualmente es investigadora del Colegio de Postgraduados Campus Córdoba. Forma parte del Sistema Nacional de Investigadores de SECIHTI Nivel I. Sus líneas de investigación son: Etnornitología, Desarrollo comunitario sustentable, promoción y conservación de la riqueza biocultural de México, Manejo tradicional de ecosistemas, Educación ambiental, ciencia ciudadana y monitoreo comunitario de aves, Estudios de transmisión del conocimiento tradicional y su erosión en contextos de cambio social y pérdida de biodiversidad, Aviturismo, Registro, sistematización y análisis de datos etnográficos mediante métodos y técnicas cualitativas-cuantitativas. En los últimos cinco años ha sido considerada entre los 100 académicos distinguidos del COLPOS, la CONABIO ha reconocido su liderazgo en monitoreo comunitario de aves. En 2012 fue distinguida con la medalla de plata "Miguel Ángel Martínez Alfaro" a la mejor tesis de doctorado por la Sociedad Mexicana de Etnobiología. Graciela es la primera ciudadana mexicana con un doctorado en Etnobiología.

graasrivalcan@gmail.com

IDALIA GARZA-VELOZ Es investigadora mexicana especializada en biología molecular y biomedicina, con trabajo en expresión génica, cultivo celular y

biomarcadores en enfermedades humanas, y amplia experiencia en investigación académica y formación de estudiantes.

idaliaqv@uaz.edu.mx

Iram Pablo Rodríguez-Sánchez Es investigador y profesor de tiempo completo en la Universidad Autónoma de Nuevo León (UANL), donde dirige el Laboratorio de Fisiología Molecular y Estructural. Es miembro del Sistema Nacional de Investigadores (SNI), Nivel III. Su trabajo se enfoca en biología molecular, genómica estructural y bioinformática, con énfasis en el estudio molecular de patógenos y vectores, así como en estrategias genómicas aplicadas a la salud. Cuenta con una amplia producción científica, experiencia en formación de recursos humanos y estancias académicas en instituciones nacionales e internacionales.

iramrodriguez@gmail.com

ISADORA HEREDIA LÓPEZ Es bióloga egresada de la Facultad de Ciencias de la UNAM, con especialización en etnobotánica y herpetología. Durante sus estudios de licenciatura, se dedicó a la divulgación científica, la educación y la interpretación ambiental, tanto en el Museo Universum como en el Herpetario de la Facultad de Ciencias de la UNAM. También es licenciada en Etnología y tiene un posgrado (maestría y doctorado) en Antropología Social por la Escuela Nacional de Antropología e Historia. Su investigación más reciente se centra en los conflictos y la defensa del territorio comunal/ejidal en el centro de México. Actualmente trabaja en la interpretación de la música tradicional del centro de Guerrero, así como en la investigación participativa en el contexto de los rituales y danzas tradicionales de los pueblos originarios de Guerrero y Oaxaca.

laisahl@gmail.com

IVÁN DELGADO ENCISO Es investigador y profesor mexicano con una sólida trayectoria en biología molecular aplicada a la medicina, particularmente en oncología, genética y enfermedades infecciosas. Es profesor-investigador en la Universidad de Colima, donde participa activamente en investigación traslacional y clínica. Su trabajo ha dado lugar a una amplia producción científica en revistas indexadas, contribuyendo al entendimiento molecular de diversas patologías y a la formación de recursos humanos en el área de la salud.

ivan_delgado_enciso@ucol.mx

IVÁN VILLALOBOS JUÁREZ Es mercadólogo y biólogo egresado de la Universidad Autónoma de Aguascalientes (UAA); se ha desarrollado como profesor asociado al departamento de biología de la UAA y como técnico en investigación en la Colección Zoológica de la UAA. Asimismo, ha trabajado en la historia natural de la serpiente de cascabel de la Isla Coronado Sur, el tráfico ilegal de serpientes de cascabel en México, el uso de hábitat de serpientes en el centro de México, la riqueza de los peces dulceacuícolas del estado de Aguascalientes y el tráfico de mamíferos en Aguascalientes. Por último, es miembro fundador de la organización Los Hijos del

Desierto que se encarga de divulgar la conservación de la biodiversidad y bioculturalidad de los desiertos mexicanos.

lepidushunter@gmail.com

J. CONCEPCIÓN RODRÍGUEZ MACIEL Profesor Investigador Titular en el Colegio de Postgraduados, institución donde ha formado a numerosas generaciones de especialistas en sanidad vegetal. Es reconocido por su amplia trayectoria en el estudio y manejo de la resistencia a insecticidas, campo en el que ha desarrollado investigaciones clave para promover estrategias sostenibles en el control de plagas agrícolas en México y América Latina. Es egresado de la Universidad Autónoma de Chapingo, donde obtuvo la licenciatura en Parasitología Agrícola. Realizó la maestría en el Colegio de Postgraduados, en el Posgrado en Fitosanidad con especialización en Entomología y Acarología, y en 1994 obtuvo el grado de Doctor por la Universidad de California, Estados Unidos, consolidando su formación científica. Su destacada labor académica e investigativa le valió el Premio Nacional de Sanidad Vegetal 2023, otorgado por la Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural, en reconocimiento a su contribución en la protección fitosanitaria y la producción agrícola sustentable.

concho@colpos.mx

JAVIER ASCENCIO GUERRERO

ja.ascencioguerrero@ugto.mx

JORGE E. RAMÍREZ-ALBORES Biólogo egresado de la UNAM. Maestría en Ciencias en Recursos Naturales y Desarrollo Rural en El Colegio de la Frontera Sur. Doctor en Ciencias Ambientales por el Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica (IPICYT). Actualmente, es profesor-investigador en la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro (UAAAN). Sus líneas de investigación e intereses académicos incluyen a la ecología de vertebrados, ecología urbana, impacto ambiental, invasiones biológicas, patrones de distribución biogeográfica y el manejo y conservación de la biodiversidad. Ha publicado más de 60 artículos en revistas indizadas y diversos artículos de divulgación. Forma parte del del Sistema Nacional de Investigadoras e Investigadores (Nivel 1 SNII).

jorgeramirez22@hotmail.com

JOSÉ MANUEL VÁZQUEZ NAVARRO Profesor de Tiempo Completo en el área de Fitotecnia de la Facultad de Agricultura y Zootecnia de la Universidad Juárez del Estado de Durango, campus Gómez Palacio, donde ha ejercido la docencia e investigación desde 1997. Su labor se centra en la formación de profesionistas en ciencias agrícolas, con énfasis en la protección vegetal, entomología aplicada y manejo sostenible de cultivos. Es Ingeniero Agrónomo Parasitólogo por la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Unidad Laguna, y obtuvo la Maestría en Ciencias en Entomología y Acarología en el Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo, donde fortaleció su especialización en el estudio de plagas agrícolas y el control biológico de insectos. Ha participado activamente en asociaciones científicas

como la Sociedad Mexicana de Entomología y la Sociedad Mexicana de Control Biológico, promoviendo la investigación y difusión de estrategias sostenibles para el manejo integrado de plagas. Su compromiso con la educación y la investigación aplicada lo posiciona como un referente en el campo de la entomología agrícola en el norte de México.

manuelvazna@hotmail.com

JUAN ANTONIO GARCÍA SALAS Profesor Titular "C" en la Facultad de Ciencias Biológicas de la UANL. Asignado al Laboratorio de Ornitología. Docencia: licenciatura 5 unidades de aprendizaje y posgrado 4 unidades. Dirección individualizada: 12 tesis de Posgrado, 19 de licenciatura y miembro de 10 más. Investigación: 25 proyectos en los estados de Tamaulipas, Nuevo León, Coahuila, Chihuahua y Texas. Área de especialidad: Ecología y Manejo de Vida Silvestre. Producción académica y de investigación: 70 artículos en revistas internacionales y nacionales con arbitraje, 10 capítulos en libros especializados, editor de 6 libros y autor de 1 manual para preparatoria. Ha dictado más de 75 conferencias especializadas en congresos internacionales y nacionales. Reconocimientos: Diploma al Mérito Académico (1984), Premio al mejor trabajo de investigación de 1992 en el Área de Ciencias Naturales, subdirector académico (2006). Coordinador de la Acentuación de Manejo de Vida Silvestre y Desarrollo Sustentable del Doctorado en Ciencias de la Facultad de Ciencias Biológicas de la UANL (2019).

juan.garciasls@uanl.edu.mx

JUAN RAMÓN BELTRAN-CASTRO Biólogo Marino egresado de la Universidad Autónoma de Baja California Sur (UABCS), Maestro en Ciencias en Manejo de Recursos Marinos y Doctor en Ciencias Marinas del Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas del Instituto Politécnico Nacional (CICIMAR-IPN). Es parte del equipo de trabajo de la Red Temática de CONACYT Código de Barras de la Vida, así mismo, cuenta con cursos sobre Biología Molecular y con una certificación en competencias profesionales bajo este mismo tópico. Cuenta con experiencia en estudios moleculares aplicados a la taxonomía, estandarización de protocolos, diseño de oligonucleótidos, así como de aspectos ecológicos y de identificación de bioindicadores aplicado a la comunidad de zooplancton. Realicé una estancia Posdoctoral con apoyo del CONAHcyT durante 2022-2024 en el Instituto Tecnológico de México – Campus Zona Maya. Actualmente y desde el 2015 me desenvuelvo como docente de nivel medio superior en el Centro de Bachillerato Tecnológico Industrial y de Servicios No.62.

juan.beltran@cbtis62.edu.mx

KATYA LIZETH ORTIZ MORALES Médica Veterinaria Zootecnista por la Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia de la Universidad Autónoma de Nuevo León. Maestra en Ciencias con Acentuación en Manejo de Vida Silvestre y Desarrollo Sustentable y doctorante en Conservación, Fauna Silvestre y Sustentabilidad por la Facultad de Ciencias Biológicas de la UANL. Más de

10 años de experiencia en manejo y conservación de fauna silvestre, habiendo colaborado con instituciones académicas, privadas y gubernamentales. Divulgadora y educadora socioecológica con certificación DC3 y Coordinadora de Educación Ambiental en Escalada Sustentable A.C.

katya.ortizmr@uanl.edu.mx

L. GERARDO HERRERA M. Biólogo por la Universidad Autónoma Metropolitana-Xochimilco, y Doctor en Ciencias por la Universidad de Miami-Coral Gables. Miembro del Sistema Nacional de Investigadores Nivel 3, es investigador de la Sede Colima de la Estación de Biología de Chamela, UNAM. Ha publicado 4 capítulos de libro y 100 artículos científicos indexados. Es editor asociado de las revistas *Frontiers in Ecology and Evolution*, and *Frontiers in Immunology*. Sus principales líneas de investigación son la ecología y la fisiología de aves y murciélagos. Estas líneas las ha enfocado para responder preguntas sobre la relación entre los patrones de alimentación y la fisiología digestiva, las adaptaciones ecológicas y fisiológicas en ambientes insulares, y la relación entre los movimientos migratorios y el funcionamiento del sistema inmunológico.

gherrera@ib.unam.mx

LAURA MACARIO-GONZÁLEZ Doctora en Ciencias Biológicas por la Technische Universität Braunschweig, Alemania. Maestría en Ciencias (opción: Biotecnología) por el Centro de Investigaciones Científicas de Yucatán (CICY). Egresada de la licenciatura en Biología del Instituto Tecnológico de Chetumal. Pertenece al sistema Nacional de investigadores nivel 1 (2022-2026). Actualmente profesor Titular "C" de tiempo completo en el Tecnológico Nacional de México (TecNM) Campus Instituto Tecnológico de la Zona Maya. Perfil Deseable PRODEP y miembro del cuerpo académico consolidado "Agroecosistemas y Biodiversidad" de esta misma institución. Cuenta con más de 30 artículos en revistas científicas con reconocimiento nacional e internacional. Miembro de red temática del Código de Barras de la Vida (MEXBOL) desde 2019. Las líneas de investigación que desarrolla son: Seguridad hídrica, ecología del zooplancton y contaminación desde el punto de vista paleolimnológica y actual para la mitigación del cambio climático.

laura.mg@zonamaya.tecnm.mx

LEONEL BAUTISTA BAUTISTA Es originario de la comunidad de Capulálpam de Méndez ubicada en la Sierra Norte de Oaxaca; es guía y monitor comunitario, con certificación como guía de turismo de naturaleza por la Secretaría de Turismo. Ha obtenido su conocimiento y experiencia en distintas áreas de la naturaleza y cuenta con 15 años de experiencia en distintos tipos de monitoreo de la biodiversidad como es el caso de mamíferos, hongos, insectos, plantas y principalmente aves. En el año de 2004 se integra a las filas de la empresa de turismo comunitario de Capulálpam de Méndez como guía comunitario, es aquí donde inicia su pasión por observar y monitorear distintas especies de la naturaleza. En el año de 2014

inicia el proceso de certificación para ser acreditado como guía de naturaleza y en el 2015 brinda apoyo a la UZACHI para dar acompañamiento al monitoreo de aves en contextos comunitarios (Capulálpam, Xiacuí, La Trinidad y Comaltepec), dicha actividad estuvo bajo la dirección del M.C. Rubén Ortega Álvarez (UNAM), en este periodo refuerza sus conocimientos en interpretación ambiental y monitoreo comunitario, en donde integra actividades de observación de aves en el XV concurso de patios y jardines, celebrado en su comunidad de origen, además de brindar talleres de observación de aves dirigido a niños y jóvenes de las escuelas de nivel básico. También se integra al programa “aVerAves” de monitoreo comunitario de aves de la NABCI/ CONABIO como técnico observador de aves. Adicionalmente forma parte del equipo de monitores de aves en la Red de Ecoturismo de la Sierra de Juárez (REDSJO), liderando la observación de aves en las comunidades de Capulálpam, Ixtlán de Juárez, Santa María Yahuiche y Santa Catarina Lachatao. En septiembre de 2015 participa en el 6° encuentro de la red de monitores comunitarios de aves, celebrado en Chetumal, Quintana Roo y organizado por la CONABIO y la NABCI, obteniendo la mención a nivel nacional como el mejor monitor comunitario de aves. Es autor y coautor de varias publicaciones formales sobre diversidad, distribución y conservación de aves, anfibios, reptiles y mamíferos, incluyendo el reciente libro intitulado “Biodiversidad de Santa Martha Latuvi, Pueblos Mancomunados, Oaxaca” y “Biodiversidad de los bosques comunitarios de la Sierra Madre de Oaxaca”.

leonel19082@gmail.com

LESLIE SARAÍ GONZÁLEZ RODRÍGUEZ Es Licenciada en Biología (2020) y Maestra en Conservación, Fauna Silvestre y Sustentabilidad (2024) por la Facultad de Ciencias Biológicas de la Universidad Autónoma de Nuevo León (UANL). Actualmente cursa el Doctorado en Conservación en la misma facultad. Desde el 2020 ha trabajado en el “Centro de Resguardo para Peces en Peligro de Extinción” del Laboratorio de Biología de la Conservación y Desarrollo Sostenible, donde se desempeña como encargada de la unidad de conservación. Su labor se centra en el manejo y conservación de especies de peces mexicanos, principalmente endémicos, que se encuentran en alguna categoría de riesgo de extinción a nivel nacional e internacional. Ha participado como ponente en foros y coloquios sobre diversidad ictiológica y casos de extinción, además de colaborar en la formación de recursos humanos en el área de la conservación y ecología acuática. También ha contribuido en proyectos relacionados con la conservación de especies dulceacuícolas, biología general y reproductiva, sistemas acuáticos y aprovechamiento sustentable.

leslie.gonzalezrdr@gmail.com

LUZ OLIVIA LEAL QUEZADA Es investigadora y jefa del Departamento de Medio Ambiente y Energía del Centro de Investigación en Materiales Avanzados (CIMAV). Estudió Ingeniería Química en la Universidad Autónoma de Chihuahua y obtuvo una especialidad en Tecnología de Alimentos en Alemania. Además, tiene una Maestría en Ciencias en Ingeniería Ambiental del ITESM y un Doctorado en Química de

la Universitat de les Illes Balears y de la Universidad de Ciencias Aplicadas de Hamburgo. Es Investigadora Nivel II del Sistema Nacional de Investigadores en México. Ha dirigido proyectos relacionados con la calidad del agua, la automatización de técnicas de análisis químico y la conservación de humedales. Ha publicado más de 90 artículos científicos y formado a 20 estudiantes en el Programa de Postgrado en Ciencia y Tecnología Ambiental. Es evaluadora de proyectos de investigación y publicaciones científicas y coordinadora de un programa de doble titulación entre el CIMAV y la Universitat de les Illes Balears. Su investigación se enfoca en los contaminantes emergentes del agua.

luz.leal@cimav.edu.mx

MARGARITA DE LA LUZ MARTÍNEZ-FIERRO Es una investigadora mexicana en medicina molecular y salud pública, profesora en la Unidad Académica de Medicina Humana y Ciencias de la Salud de la Universidad Autónoma de Zacatecas (UAZ). Es Investigadora Nacional del Sistema Nacional de Investigadores (SNI) de México.

margaritamf@uaz.edu.mx

MARIO MURGUIA PÉREZ Especialidad en Anatomía Patológica – Hospital General de México “Dr. Eduardo Liceaga” / Universidad Nacional Autónoma de México – 2007-2010. Fellowship en Anatomía Patológica Oncológica – Hospital General de México “Dr. Eduardo Liceaga” – 2010-2011. Alta especialidad (Fellowship) en Hematopatología – Sociedad Médica del Hospital General de México – 2010-2011. Máster en Oncología Molecular – Universidad Rey Juan Carlos – Madrid, España – 2019 a 2020. Máster en Especialización en Patología Oncológica – Universidad Cardenal Herrera – Tenerife, España – 2020 a 2021. Certificación europea en la lectura e interpretación de PDL1 en tumores sólidos – 2021. Profesor adjunto del Curso de Especialidad en Anatomía Patológica – UMAE Hospital de Especialidades N° 1 Centro Médico Nacional Bajío. Profesor titular del Fellowship en Patología Oncológica – UMAE Hospital de Especialidades N° 1 Centro Médico Nacional Bajío. Sistema Nacional de Investigadores del CONACYT -2022. Director, co-director y asesor en más de 10 tesis de la especialidad médica y afines, y 1 tesis de maestría en ciencias aplicadas. Autor y coautor de más de 25 artículos en revistas indexadas de lengua hispanoparlante e inglesa. Miembro del Comité Editorial de la Revista Española de Patología (2011 a la fecha). Miembro del Editorial Board del Journal of Interdisciplinary Histopathology. Jefe del Departamento de Anatomía Patológica. UMAE Hospital de Especialidades N°1, Centro Médico Nacional Bajío. IMSS.

drmariopatologia@gmail.com

MARTHA HERNÁNDEZ-GONZÁLEZ

martha_gdz@hotmail.com

MIRIAM DELGADO AGUILAR

mjaguilar@uach.mx

PABLO OCTAVIO AGUILAR Licenciado en Biología por la Universidad Veracruzana, Maestro en Genética y Biología Molecular por el Centro de Investigación y Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional, Doctor en Ecología y Manejo de Recursos Naturales por el Instituto de Ecología A. C. Realizó dos años de estancia posdoctoral en el Instituto de Biotecnología y Ecología Aplicada de la Universidad Veracruzana. Cuenta con más de 25 años de experiencia docente, ha impartido más de 72 cursos, entre los que destacan Inmunología, Virología, Genética, Biología Molecular, Estadística, Estadística Multivariada, Certificación en Gestión Ambiental, Educación Ambiental, entre otras. Es especialista en Genética, Demografía, Estadística, así como en Biología y Ecología Molecular. Ha publicado 58 artículos indexados, 13 artículos arbitrados, 15 artículos de divulgación y 8 capítulos de libro. Ha dirigido 9 tesis de licenciatura, 9 tesis de maestría, 7 tesis doctorales y dos proyectos de investigación con financiamiento. Es miembro del Sistema Nacional de Investigadores e Investigadoras de la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación con el Nivel II y cuenta con perfil deseable PRODEP. Fue Profesor-Investigador Titular C del Doctorado en Biología del Instituto Tecnológico de Ciudad Victoria, Tamaulipas, México. Fue coordinador de la Licenciatura en Biología y de la Maestría en Gestión Ambiental, ambos programas de la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo. Se encuentra adscrito como profesor Investigador Titular B de Tiempo Completo y colabora en el Laboratorio de Genética del Centro de Investigaciones Biológicas en la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo.

pablo_aguilar9900@uaeh.edu.mx

PLUTARCO HERNÁNDEZ-HERNÁNDEZ Estudió la Licenciatura en Biología en el Instituto Tecnológico de Chetumal. Maestría en Manejo de Zonas Costera en el Instituto Tecnológico de Chetumal y actualmente estudia un doctorado en Ciencias Ambientales en el Tecnológico Nacional de México. Ha participado en congresos nacionales e internacionales de Biología y Biodiversidad (SOMPAC, RECORECOS). Ha tomado diversos talleres y cursos relacionados con la divulgación, uso de las tecnologías, análisis de datos y estudios ecológicos. Ha impartido las materias de Ecología e Invertebrados no artrópodos en el Instituto Tecnológico de Chetumal, y brindados talleres de conocimiento sobre calidad de agua y bioindicadores. Actualmente codirige la tesis de dos alumnos de Licenciatura en el área de Biología.

d12390410@chetumal.tecnm.mx

R. CARLOS ALMAZÁN-NÚÑEZ Ecológico por la UAGro, Maestro en Recursos Bióticos por la Universidad Autónoma de Querétaro y Doctor en Ciencias Biológicas por la Universidad Autónoma Metropolitana. Miembro del Sistema Nacional de Investigadores Nivel 2. Es fundador y miembro del Núcleo Académico de la Maestría y Doctorado en Recursos Naturales y Ecología de la UAGro. Ha publicado un libro, siete capítulos de libro y 57 artículos científicos indexados. Es editor asociado de la revista Ornithological

Applications. Sus principales líneas de investigación son la ecología de interacciones bióticas, ecología de poblaciones y comunidades, biogeografía y biología de la conservación. Estas líneas las ha enfocado para responder preguntas sobre de la distribución de la avifauna y sus requerimientos ecológicos con herramientas de modelación del nicho ecológico, así como para conocer los efectos de la actividad humana en las comunidades bióticas y sus procesos ecológicos.

rcarlos.almazan@gmail.com

RAMÓN CASTELLANOS GIRALDA Es especialista en manejo de vida silvestre, biología de la conservación, monitoreo y evaluación de hábitat y poblaciones, estudios aéreos, terrestres y subacuáticos de vida silvestre. Trabajó cinco años en la región de Los Chimalapas (2009-2014) con apoyo de Mexichem y en colaboración con la CONABIO, la CONANP y las comunidades locales, recorriendo prácticamente todo el territorio comunal pasando seis meses al año en trabajo de campo. Actualmente forma parte de Wildlife Conservation Services México.

vidasilvestre@me.com

RAÚL ORTIZ PULIDO Biólogo por la Universidad Veracruzana (1994) y Doctor en Ciencias por el Instituto de Ecología A.C. (2000). Ex ajedrecista infantil (campeón de ciudad 1979), Ex atleta juvenil (campeón intercontinental 1985), científico (SNI II III y reconocimientos internacionales desde 1995), líder de científicos (desde 1998; e.g. Sociedad para el Estudio y Conservación de las Aves de México, North American Bird Conservation Initiative), creador de instituciones (e.g., Huitzil revista mexicana de ornitología 2000, Sociedad de Astronomía de la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo 2002, Reserva Privada las Coas 2016), editor y revisor internacional (e.g., The Auk, The Condor, Ornitología Neotropical, desde 2000), profesor universitario (desde 1991, e.g., Universidad Veracruzana, Universidad de las Américas Puebla, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo), artista (fotógrafo paisajista desde 1991), organizador de eventos nacionales e internacionales (desde 1997, e.g., Congreso para el Estudio y Conservación de las aves de México y North American Ornithological Congress), empresario (Magos de los Bosques S.A. de C.V. 2018) y astrónomo aficionado (desde 2002).

raulortizpulido@yahoo.com

ROBERTO ALEJANDRO ARREGUÍN ESPINOSA DE LOS MONTEROS Es un distinguido investigador y docente con amplia experiencia en el campo de la bioquímica marina. Realizó la licenciatura en Biología y el doctorado en Bioquímica en la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). Ha realizado estancias académicas en instituciones de renombre, como la Universidad Estatal de Louisiana, la Universidad Texas A&M y la Universidad Goethe de Alemania, con apoyo de la Agencia Internacional de Energía Atómica (IAEA). Como investigador titular en el Instituto de Química de la UNAM, es miembro del Sistema Nacional de Investigadores (SNI) en el nivel 3. Su investigación se enfoca en los compuestos bioactivos marinos y los procesos bioquímicos de los organismos marinos. Ha publicado más de 145 artículos

internacionales, cinco capítulos de libros y ha recibido más de 2,900 citas. El Dr. Arreguín también es mentor, habiendo supervisado a numerosos estudiantes de posgrado. Ha recibido becas de investigación del CONACYT y PAPIIT-UNAM y es miembro activo de diversas sociedades científicas, incluida la Sociedad Mexicana de Bioquímica.

arrespin@unam.mx

RODOLFO CONTRERAS MARTÍNEZ Ingeniero Agrónomo Fitotecnista egresado de la Universidad Autónoma de Chihuahua (UACH). Maestro en Educación por Competencias por la Universidad del Valle de México (UVM) y recientemente concluyó el Doctorado en Ecología y Gestión Ambiental en el Centro Universitario Bunpland & Humboldt. Posee más de diez años de experiencia docente en los niveles medio superior y superior. Actualmente se desempeña como Coordinador del Área de Ciencias y profesor en el Centro de Estudios de Bachillerato 6/4 de Ciudad Delicias, Chihuahua. A su vez, forma parte del cuerpo académico de la Facultad de Ciencias Agrícolas y Forestales de la UACH, donde imparte asignaturas como Invernaderos, Sistemas de Producción y Ecología, además de estar a cargo de la operación y supervisión de los invernaderos institucionales. También colabora como profesor en la Universidad Vizcaya de las Américas, Campus Delicias, en el área de Ciencias de la Educación. Sus líneas de investigación se centran en la agricultura protegida, los sistemas de producción agrícola sostenible y los sistemas de producción en ambientes controlados con tecnologías de luz LED y UV. Ha liderado diversos proyectos académicos, ambientales y de vinculación comunitaria con enfoque interdisciplinar. Destaca en su trayectoria la formulación y coordinación de un programa de doble titulación entre la UACH y la New Mexico State University (NMSU), dirigido a estudiantes de licenciatura y posgrado, como parte de un esfuerzo estratégico de internacionalización académica. Su labor docente, investigativa y de gestión se distingue por su orientación a la innovación tecnológica, la sustentabilidad agroambiental y la formación integral de estudiantes con alto sentido ético y responsabilidad social.

rcontrerasm@uach.mx

SANDRA PÉREZ ÁLVAREZ Profesora titular C de la Facultad de Ciencias Agrícolas y Forestales de la UACH. Miembro del SNII nivel I, miembro del Cuerpo Académico "Manejo sustentable de sistemas agrícolas y forestales" trabajando la LGAC manejo de los recursos naturales para la mejora integral de sistemas agrícolas y forestales con las líneas de investigación biofertilization, cultivo in vitro y Fisiología vegetal. Obtuvo su título universitario en 1993 como Ingeniera Agrónoma en la Universidad Agraria de La Habana, Cuba, y su maestría en Fitopatología en 2001 en la Universidad de Zhejiang, China. En 2009 se graduó como Doctora en Ciencias Agropecuarias en la Universidad Agraria de La Habana, Cuba. Es autora o coautora de más de 60 artículos científicos, 4 libros y 21 capítulos de libros, todos en el área de agricultura.

spalvarez@uach.mx

SERGIO COHUO Profesor investigador tiempo completo del Tecnológico Nacional de México, adscrito al Instituto Tecnológico de Chetumal. Es doctor en Ciencias ambientales por la Technische Universität Braunschweig y pertenece al Sistema Nacional de investigadores nivel I desde el 2021. Actualmente desarrolla investigación sobre temas estratégicos en el agua, como seguridad hídrica, biodiversidad (zooplancton), contaminación, y mitigación del cambio climático, desde una perspectiva integral en ambientes recientes y pasados. En paleo ambientes, trabaja con (paleo) bioindicación usando grupos del zooplancton como ostrácodos de agua, para determinar cambios en los regímenes de precipitación, alteración de la biodiversidad acuática, y detección de zonas hidrológicas prioritarias en la Península de Yucatán, desde el Pleistoceno tardío.

sergio.cd@chetumal.tecnm.mx

SYLVIA MARTÍNEZ HERNÁNDEZ Grado de doctor en Ciencias Ambientales otorgado por la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, con el trabajo "Evaluación de la resistencia a hipoclorito de sodio de bacterias aisladas del efluente de una depuradora. Título de Licenciada en Biología obtenido en la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, con la tesis: Estudio de los géneros bacterianos Escherichia y Pseudomonas como indicadores de la calidad del agua residual tratada en una depuradora. Profesora Investigadora de Tiempo Completo en la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, donde ejerce las líneas de investigación de microbiología aplicada en biorremediación y tratamiento de aguas residuales. Así como las asignaturas Biología de Procariontes en Licenciatura y Evaluación de Impacto Ambiental en la Maestría en Gestión Ambiental.

sylvia_martinez10436@uaeh.edu.mx

VERÓNICA RODRÍGUEZ SALDAÑA Es Ingeniera Ambiental de la Universidad Autónoma de Chihuahua y realizó una Maestría en Química Acuática en la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), graduándose con honores en ambos. Obtuvo su doctorado en Salud Ambiental en la Universidad de McGill, en Canadá, con una investigación financiada por el gobierno de Quebec. Ha publicado diversos artículos en revistas internacionales de alto impacto y ha recibido distinciones por sus presentaciones en conferencias. Su investigación se ha centrado en química analítica ambiental, bioacumulación de contaminantes, salud ambiental y el desarrollo de métodos analíticos para la detección de contaminantes. Ha sido docente desde 2017, tanto en Canadá como en México. Actualmente es investigadora postdoctoral en el Centro de Investigación en Materiales Avanzados (CIMAV), donde ha colaborado en proyectos nacionales e internacionales, es asesora y supervisora de estudiantes de posgrado y trabaja en nuevas metodologías analíticas para monitorear contaminantes emergentes.

veronica.rodriguez@cimav.edu.mx

VIANEY GONZÁLEZ-VILLASANA Químico Bacteriólogo Parasitólogo y Doctora en Ciencias con Acentuación

en Biotecnología. Grados otorgados por la Universidad Autónoma de Nuevo León. Posdoctorado en el laboratorio del Dr. Gabriel López Berestein. Departamento de Terapia Experimental, Universidad de Texas MD Anderson Cancer Center, Houston Texas. Profesora e investigadora en la Facultad de Ciencias Biológicas de la UANL. Imparte los cursos de Biología Molecular. Forma parte del Posgrado con Orientación en Inmunobiología en la Facultad de Ciencias Biológicas. Su línea de investigación es en terapia experimental en cáncer. Miembro del Sistema Nacional de Investigadores Nivel I.

vianey.gonzalezvl@uanl.edu.mx

VÍCTOR MANUEL ALMARAZ VALLE Es entomólogo mexicano especializado en manejo integrado de plagas agrícolas y control biológico. Su trabajo se centra en el estudio de la ecología, comportamiento y resistencia de insectos plaga de importancia económica, así como en el uso de estrategias sostenibles para su control en cultivos hortícolas y frutales. Es egresado de la Facultad de Agricultura

y Zootecnia, con una maestría en ciencias en el Colegio de Postgraduados, donde forma parte del Posgrado en Fitosanidad – Entomología y Acarología, y ha colaborado en proyectos relacionados con la resistencia a insecticidas, la bioecología de enemigos naturales. Ha participado en la formación de estudiantes de licenciatura, ha impartido cursos y talleres especializados en entomología y toxicología. Promueve la investigación orientada a la sostenibilidad, la innovación y la protección del ambiente.

almaraz.victor@colpos.mx

XIMENA VÁZQUEZ CADENA Estudiante de licenciatura de la carrera Químico Bacteriólogo Parasitólogo de último semestre de la Facultad de Ciencias Biológicas en la Universidad Autónoma de Nuevo León. Con un intercambio en Alemania enfocado en el área de la inmunobiología y el cáncer.

ximena.vazquezcdn@uanl.edu.mx

Biología y Sociedad



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

UANL

FCB

FACULTAD DE CIENCIAS BIOLÓGICAS

